

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра виробництва приладів

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Шевченко В.В.

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

**на тему: «Адаптивне керування процесом обробки деталей приладів на
верстатах з ЧПК»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ПБ-61м
Богачов Є.В.

Керівник:

к.т.н., доцент кафедри виробництва приладів
Шевченко В.В.

Консультант з розділу стартап-проекту:

доцент кафедри менеджменту, к.е.н., доцент
Бояринова К.О.

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2018

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра Виробництва приладів
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.О. завідувача кафедри

Шевченко В.В.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студента**

Богачова Євгенія Вадимовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Адаптивне керування процесом обробки деталей приладів на верстатах з ЧПК»

_____,
науковий керівник дисертації Шевченко Вадим Володимирович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «23» березня 2018 р. № 1006-с

2. Термін подання студентом дисертації 10 травня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження процес різання при обробці деталей на верстатах з ЧПК

4. Предмет дослідження Адаптивне керування процесом обробки деталей

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Провести критичний аналіз існуючих систем та методів адаптивного керування; на основі досліджень процесу різання встановити взаємозв'язок крутного моменту та віброакустичної емісії зі зношуванням інструменту; розробити математичну модель, за якою буде функціонувати система адаптивного керування; провести математичне моделювання та розробити програмне забезпечення системи; розробити та вдосконалити двопараметричну систему адаптивного керування; створити структурну схему та алгоритм функціонування адаптивної системи керування; створити структурну схему та алгоритм функціонування адаптивної системи керування; розробити стартап проект.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу Аналіз методів та систем адаптивного керування процесом обробки деталей в умовах безлюдної технології. Класифікація систем адаптивного керування. Аналіз методів адаптивного керування. Критерій оптимізації. Схема функціонування та алгоритм роботи адаптивної системи керування. Теоретичні основи побудови системи адаптивного керування процесу обробки деталей в умовах безлюдної технології. Фізичні основи процесу різання. Види зношування та аналіз методів контролю. Основні причини виникнення віброакустичної емісії. Крутний момент та методи його вимірювання. Розробка математичної моделі. Розробка системи адаптивного керування процесом обробки деталей приладів на верстатах з ЧПК в умовах безлюдної технології. Розробка структурної схеми системи адаптивного керування. Розробка алгоритму функціонування системи адаптивного керування зношування різального інструменту. Розробка програмного забезпечення системи адаптивного керування процесу обробки деталей. Експериментальні дослідження залежності віброакустичної емісії та крутного моменту зі зносом інструменту. Стартап-проект реалізації адаптивної системи керування обробкою деталей приладів на верстатах з ЧПК.

7. Орієнтовний перелік публікацій Статті та тези доповідей за темою магістерської дисертації (надано в Додатку в вигляді Форми 2б)

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Бояринова К.О., к.е.н., доцент		

9. Дата видачі завдання 16.03.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд існуючих систем та методів адаптивного керування, видів та методів контролю зношення інструменту.	30.03.2018 р.	
2	Розробити математичної моделі системи адаптивного керування	20.04.2018 р	
3	Створення структурної схеми та алгоритму роботи системи адаптивного керування	25.04.2018 р.	
4	Розробка двопараметричної системи адаптивного керування	5.05.2018 р.	
5	Створення стартап-проекту	9.05.2018 р.	

Студент

(підпис)

Є.В. Богачов
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

В.В. Шевченко
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська атестаційна робота на тему: «Адаптивне керування процесом обробки деталей приладів на верстатах з ЧПК» складається із 102 аркушів. До неї входять 31 рисунок, 22 таблиці, 3 додатки. В роботі використано 40 бібліографічних найменувань.

Основним завданням роботи є розробка системи адаптивного керування процесом обробки деталей на верстатах з ЧПК в умовах «безлюдної технології».

В роботі проаналізовано методи та засоби адаптивного керування, розглянута класифікація систем адаптивного керування, розглянуті види зношення та проаналізовані методи його контролю. На основі даної інформації було прийняте рішення про створення двопараметричної системи адаптивного керування процесом обробки деталей приладів на основі сигналів віброакустичної емісії та крутного моменту різання. Створено математичну модель та структурну схему роботи системи, складено алгоритм функціонування. Розроблено програмне забезпечення для розрахунку зношення різального інструменту по задній поверхні. Проведено експериментальні дослідження залежності вибраних параметрів від зношення.

Результати роботи можуть використовуватися приладобудівними підприємствами для покращення якості та надійності обробки та зменшення відсотку бракованої продукції.

Ключові слова: АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ВІБРОАКУСТИЧНА ЕМІСІЯ, КРУТНИЙ МОМЕНТ РІЗАННЯ, ПРОЦЕС ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ.

ABSTRACT

Master's attestation work on the topic: "Adaptive management of the process of processing parts of devices on CNC machines" consists of 102 sheets. It includes 31 drawings, 22 tables, 3 attachments. 40 bibliographic titles were used in this work.

The main task of the work is to develop a system of adaptive control of the process of processing parts on CNC machine tools under the conditions of "deserted technology".

In this work the methods and means of adaptive control are analyzed, classification of adaptive control systems is considered, types of wear are considered and methods of its control are analyzed. On the basis of this information, a decision was made to create a two-parameter system of adaptive control of the processing of parts of devices based on signals of vibration acoustic emission and torque cutting. The mathematical model and structural scheme of the system work, the algorithm of functioning is compiled. The software for calculating the wear of the cutting tool on the back surface is developed. Experimental studies of the dependence of the selected parameters on deterioration have been carried out.

The results of the work can be used by instrument-making enterprises to improve the quality and reliability of processing and reduce the percentage of defective products.

Key words: ADAPTIVE CONTROL SYSTEM, VIA ACOUSTIC EMISSION, CURRENT MOMENT OF CUTTING, PROCESS OF PROCESSING OF ITEMS OF DEVICES.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	7
ABSTRACT	8
ВСТУП	11
1..... АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ БЕЗЛЮДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	14
1.1. Класифікація систем адаптивного керування.....	15
1.2. Аналіз методів адаптивного керування.....	21
1.3. Критерій оптимізації	28
1.4. Схема функціонування та алгоритм роботи адаптивної системи керування	30
Висновки до розділу	36
2..... ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ БЕЗЛЮДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ.....	37
2.1. Фізичні основи процесу різання	37
2.2. Види зношування та аналіз методів контролю процесу обробки	44
2.2.1. Аналіз критеріїв та видів зношення різального інструменту	44
2.2.2. Аналіз методів та засобів контролю зношування різального інструмента	48
2.3. Основні причини виникнення віброакустичної емісії.....	54
2.4. Крутний момент та методи його вимірювання	58
2.5. Розробка математичної моделі.....	60
Висновки до розділу	62
3..... РОЗРОБКА СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК В УМОВАХ БЕЗЛЮДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	63
3.1. Розробка структурної схеми системи адаптивного керування.....	63
3.2. Розробка алгоритму функціонування системи адаптивного керування зношування різального інструменту	66

3.3. Розробка програмного забезпечення системи адаптивного керування процесу обробки деталей	67
Висновки до розділу	68
4..... ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ.....	70
4.1. Методика проведення досліджень	70
4.1.1. Техніка вимірювання віброакустичної емісії	71
4.1.2. Техніка вимірювання крутного моменту	73
4.2. Експериментальні дослідження залежності віброакустичної емісії та крутного моменту зі зносом інструменту.....	74
Висновки до розділу	82
5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК»	84
5.1 Опис ідеї проекту	84
5.2. Технічний аудит ідеї проекту	86
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	86
5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	93
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	95
Висновки до розділу	99
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	102
ДОДАТОК.....	106

ВСТУП

Сучасне приладобудування покликане забезпечувати народне господарство ефективними засобами і системами управління на основі широкого використання досягнень науки. Вивчаються процеси управління різними виробництвами, постачання ресурсами, обслуговування, адміністративно-господарської діяльності, виявляються оптимальні вимоги до систем і засобів, визначаються економічно і технічно доцільні шляхи їх реалізації, розробляються типові вирішення конкретних завдань управління при мінімізації номенклатури виробів приладобудування [1].

Головне завдання приладобудування - розвиток автоматизованих систем управління в народному господарстві країни на основі сучасних технічних засобів. Це досягається типізацією проектних рішень, автоматизацією систем проектування, уніфікацією, агрегатуванням і комплектною поставкою технічних засобів [1].

Приладобудування займає чільне місце в промисловості розвинених країн. Різноманітні вимірювальні, аналітичні, геофізичні та ін. прилади, обчислювальні і випробувальні машини, пристрої передачі даних, засоби телемеханіки і оргтехніки, комплексні системи контролю і регулювання випускають багато фірм Великобританії, Італії, Японії, США, Німеччини, Франції [1].

У сучасному виробництві більша частина деталей складної форми виготовляється переважно обробкою різанням, причому забезпечується висока точність, а також продуктивність [2].

Основними факторами, які впливають на вихідні показники процесу різання, є пружні деформації технологічної системи, яка знаходиться під силовим впливом, які впливають на стійкість процесу різання [2].

Одним з важливих напрямків підвищення якості обробки при різанні в автоматизованому виробництві є адаптивне керування процесом різання. На даний момент існує безліч адаптивних систем керування процесу різання, але питання точності, надійності та якості все ще залишаються актуальними. Тому розробка нових адаптивних систем є необхідним кроком для збільшення обсягів виробництва та мінімізації випуску бракованої продукції [3].

Об'єктом дослідження є процес різання при обробці деталей на верстатах з ЧПК в умовах «безлюдної технології».

Предметом дослідження є адаптивне керування процесом обробки деталей на верстатах з ЧПК в умовах «безлюдної технології».

Метою магістерської дисертації є розробка та вдосконалення двопараметричної адаптивної системи керування процесу обробки деталей на станках з ЧПК в умовах «безлюдного виробництва», що дозволить підвищити точність та надійність процесу обробки та якість поверхні деталей приладів.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні завдання:

- Провести критичний аналіз існуючих систем та методів адаптивного керування;
- на основі досліджень процесу різання встановити взаємозв'язок крутного моменту та віброакустичної емісії зі зношуванням інструменту;
- розробити математичну модель, за якою буде функціонувати система адаптивного керування;
- провести математичне моделювання та розробити програмне забезпечення системи;
- розробити та вдосконалити двопараметричну систему адаптивного керування;
- створити структурну схему та алгоритм функціонування адаптивної системи керування;
- провести експериментальні дослідження залежності крутного моменту та віброакустичної емісії від зношення інструменту.

Наукова новизна

У магістерській дисертації отримані наступні результати, які володіють науковою новизною:

1. Розроблена математична модель зношення різального інструменту від параметрів ВАЕ та крутного моменту.
2. Розроблене програмне забезпечення для опису математичної моделі та ілюстрації залежності зношення інструменту від параметрів крутного моменту та ВАЕ.
3. Створена структурна схема роботи адаптивної системи керування та алгоритм її роботи.
4. Створена двопараметрична система адаптивного керування на основі крутного моменту та ВАЕ.

Результати роботи можуть бути використані у наукових дослідженнях схожої тематики. Вдосконалена адаптивна система керування процесу обробки може використовуватись на приладобудівних підприємствах.

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ БЕЗЛЮДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Теорія систем адаптивного керування виникла в зв'язку з необхідністю вирішення широкого класу прикладних задач, для яких неприйнятні традиційні методи, що вимагають знання адекватної математичної моделі об'єкта. Якість традиційних методів керування тим вище, чим більше відомої інформації про сам об'єкт та умови його функціонування. Математично на практиці досить важко забезпечити точний опис об'єкта керування. Наприклад, динамічні характеристики літальних апаратів сильно залежать від технологічних розходжень, режиму польоту, стану атмосфери. У цих умовах традиційні методи часто виявляються неприйнятними або не забезпечують необхідну якість системи автоматичного керування [3].

У зв'язку з цим вже на початковому етапі розвитку теорії автоматичного керування видавався дуже ефективним шлях побудови керуючих систем, які не потребують повної апріорної інформації про об'єкт та умови його функціонування.

Ефект пристосування до умов функціонування в адаптивних системах забезпечується за рахунок накопичення і обробки інформації про поведінку об'єкта керування в процесі його функціонування, що дозволяє істотно знизити вплив невизначеності на якість керування, компенсуючи недолік апріорної інформації на етапі проектування систем [4].

Система керування, що автоматично визначає необхідний закон керування за допомогою аналізу поведінки об'єкта керування при поточному керуванні, називається адаптивною [3].

Відомі пропозиції щодо застосування адаптивних пошукових систем керування в авіації, проте, основне практичного застосування системи екстремального регулювання отримали в інших галузях промисловості.

На цей день теорія автоматичного керування є прикладною наукою, що вивчає основи побудови і розрахунків систем керування технічними об'єктами. У чому ж полягають особливості у викладі традиційних понять автоматичного керування стосовно до обробки металів різанням?

У цій області головним керованим об'єктом є процес різання, в результаті виконання якого необхідно забезпечити всі вимоги щодо якості при максимальній продуктивності. На процес різання впливає безліч факторів, які можуть бути як детермінованими, з достатнім ступенем точності, так і випадковими, ясно що всі ці чинники заважають досягненню поставленої мети.

У цих умовах при проектуванні технологічного процесу обробки для гарантованого отримання придатної деталі розрахунок режимів різання ведуть за найгіршим поєднанням діючих факторів, що, безсумнівно, призводить до певних втрат продуктивності. Крім того існує цілий клас деталей низькою жорсткості і деталей зі складними поверхнями, при обробці яких умови обробки змінюються в різних місцях котурни в десятки разів. Рішення цих найважливіших завдань найбільш ефективно шляхом застосування систем автоматичного керування, які дозволяють отримати високу точність, швидкодію робочих і допоміжних переміщень робочих органів верстатів і мають можливість швидкого переналагодження.

Фундаментальні поняття учення про автоматичне керування, які налічують вже понад 100 років, залишаються актуальними і на сучасному етапі розвитку техніки [5].

1.1. Класифікація систем адаптивного керування

Адаптивними системами автоматичного керування (АСАК) називаються системи, в яких параметри, за якими ведеться керування, або алгоритм керування автоматично і цілеспрямовано адаптуються для здійснення найкращого керування об'єктом, причому характеристики об'єкта або впливу зовнішнього середовища можуть змінюватися невизначеним чином [6].

Виходячи з того, що основним призначенням такої системи автоматичного керування (САК) є досягнення необхідної мети керування в заздалегідь невизначених умовах, тобто за неповної апріорної інформації, необхідної для керування в заданому сенсі, всі автоматичні системи можна розділити на два класи [6]:

1. Системи, в яких неповнота інформації істотно не заважає досягненню якісного керування, і тому можна не передбачати автоматичного поповнення інформації в системі. Системи без поповнення інформації відомі давно - це системи програмного регулювання, стабілізації.

2. Системи, які не можуть досягти високої якості керування при первинному рівні інформації, необхідної для керування в заданому сенсі. Природним шляхом подолання цієї перешкоди є автоматичне поповнення інформації, якої бракує в процесі роботи системи. Процес поповнення інформації, необхідної для керування в заданому сенсі, можна назвати адаптацією.

Про ступінь досягнення повноти інформації можна судити за деяким критерієм якості. Зазвичай критерій якості пов'язаний з тими характеристиками, за якими відбувається адаптація системи [6].

Незважаючи на значні труднощі в класифікації адаптивних систем, можна виділити два класи адаптивних системи: самоналагоджувальні і ті, які навчаються.

Системи, що навчаються - це такі системи, в яких поповнення інформації, якої не достає здійснюється в процесі навчання, виробленому, як правило, шляхом зовнішнього коректування алгоритму системи людиною або спеціальним автоматичним пристроєм, який заздалегідь знає спосіб оптимального функціонування в даній ситуації.

Іншим найбільш поширеним класом адаптивних систем є самоналагоджувальні системи (СНС), які відрізняються тим, що не містять елементів навчання. Системи, що самостійно навчаються знаходять найбільше поширення при оптимізації складних технологічних процесів [7].

Роботу СНС в загальному вигляді можна представити як процес автоматичного вимірювання основних показників функціонування об'єкта керування і автоматичного налаштування характеристик керуючого пристрою для досягнення найкращої якості. Структурна схема СНС показана на Рис.1.1, де на відміну від звичайних систем автоматичного керування, що містять об'єкт O і керуючий пристрій $KП$, з'являється блок визначення характеристик і налаштування $БохН$. Джерелами інформації, необхідної для налаштування керуючого пристрою системи, можуть бути: контрольовані обурення, вихідні змінні об'єкта, діючі на об'єкт, налагоджувальні впливи, крім того на систему діють неконтрольовані обурення [7].

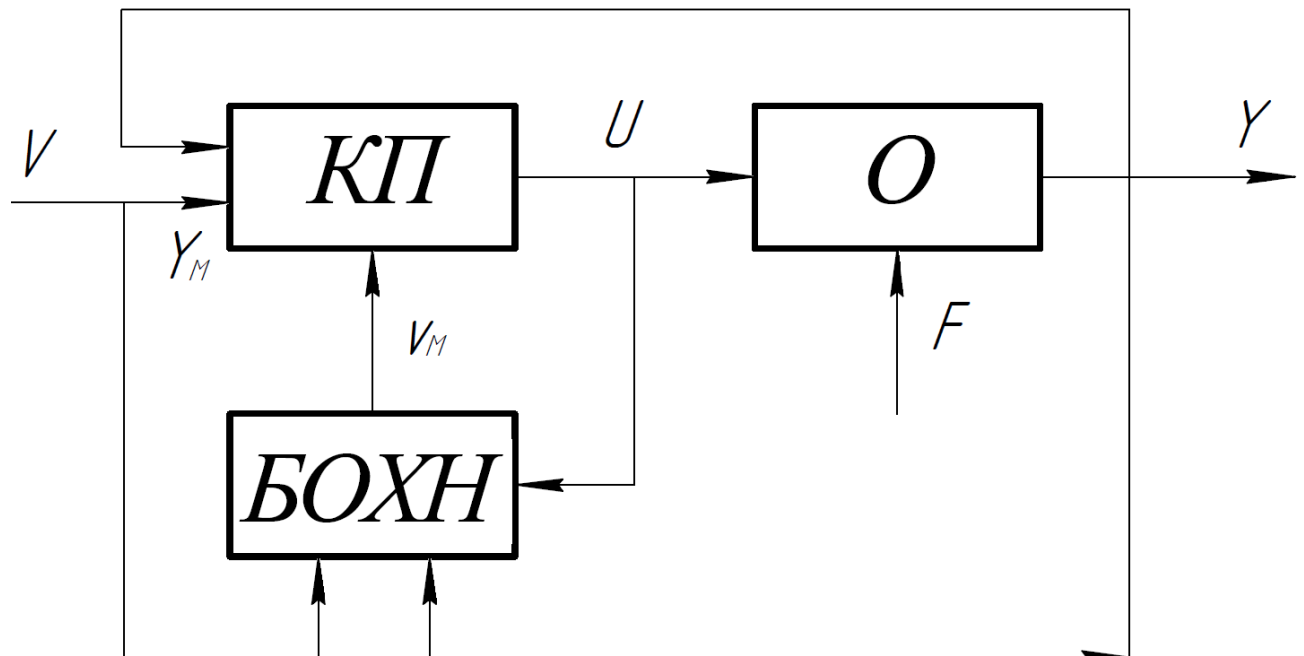


Рис.1.1. Загальна схема СНС

У наведеній на Рис.1.1 узагальненій схемі СНС є контур керування і контури налаштування. У конкретних системах деякі контури можуть бути відсутніми, а блоки керуючого пристрою, визначення характеристик та налаштування самі можуть представляти СНС, всередині яких також можна намітити зазначені основні блоки.

У СНС в загальному випадку виробляються визначення наступних характеристик:

1) визначення характеристик об'єкта (або замкнутої системи «об'єкт - керуючий пристрій») по змінним, яке може відбуватися як в режимі реального функціонування об'єкта, так і поштучного введення пробних сигналів;

2) визначення вхідних змінних;

3) визначення характеристик вихідних змінних.

Відповідно до зазначених трьох джерел інформації можна розділити СНС системи на чотири групи [7].

Блок визначення характеристик і налаштування обчислює критерій якості системи, і порівнює його з необхідним або знайденим раніше, після чого видається рекомендація на зміну параметрів керуючого пристрою, наприклад зміна режимів обробки деталі. При цьому вельми істотним є спосіб, яким здійснюється в СНР настройка керуючого пристрою. За методом поповнення інформації виділяють три типи СНС [7]: пошукові, безпошукові і комбінованого типу (Рис.1.2).

У безпошукових системах інформація, отримана в блоці визначення характеристик і налаштування, достатня для визначення напрямку і величини зміни параметрів керуючого пристрою. В інших випадках цієї інформації недостатньо, у зв'язку з чим необхідно провести додаткове дослідження. Для цього використовуються пошукові СНС, що характеризуються в більшості випадків наявністю спеціальних пробних рухів, в ході яких з'ясовуються шляхи поліпшення роботи системи та визначаються робочі рухи, які проводять це поліпшення наміченим шляхом.

Загальним недоліком пошукових систем є відносно мала швидкодія, тому їх практичне застосування обмежене завданнями оптимізації усталених режимів об'єктів. Безпошукові системи, навпаки, є більш швидкодіючими. Це дозволяє використовувати такі системи для керування об'єктами, режими і динамічні характеристики яких змінюються досить швидко. Разом з тим слід зазначити, що в багатьох випадках пошукові системи більш прості в реалізації [7].

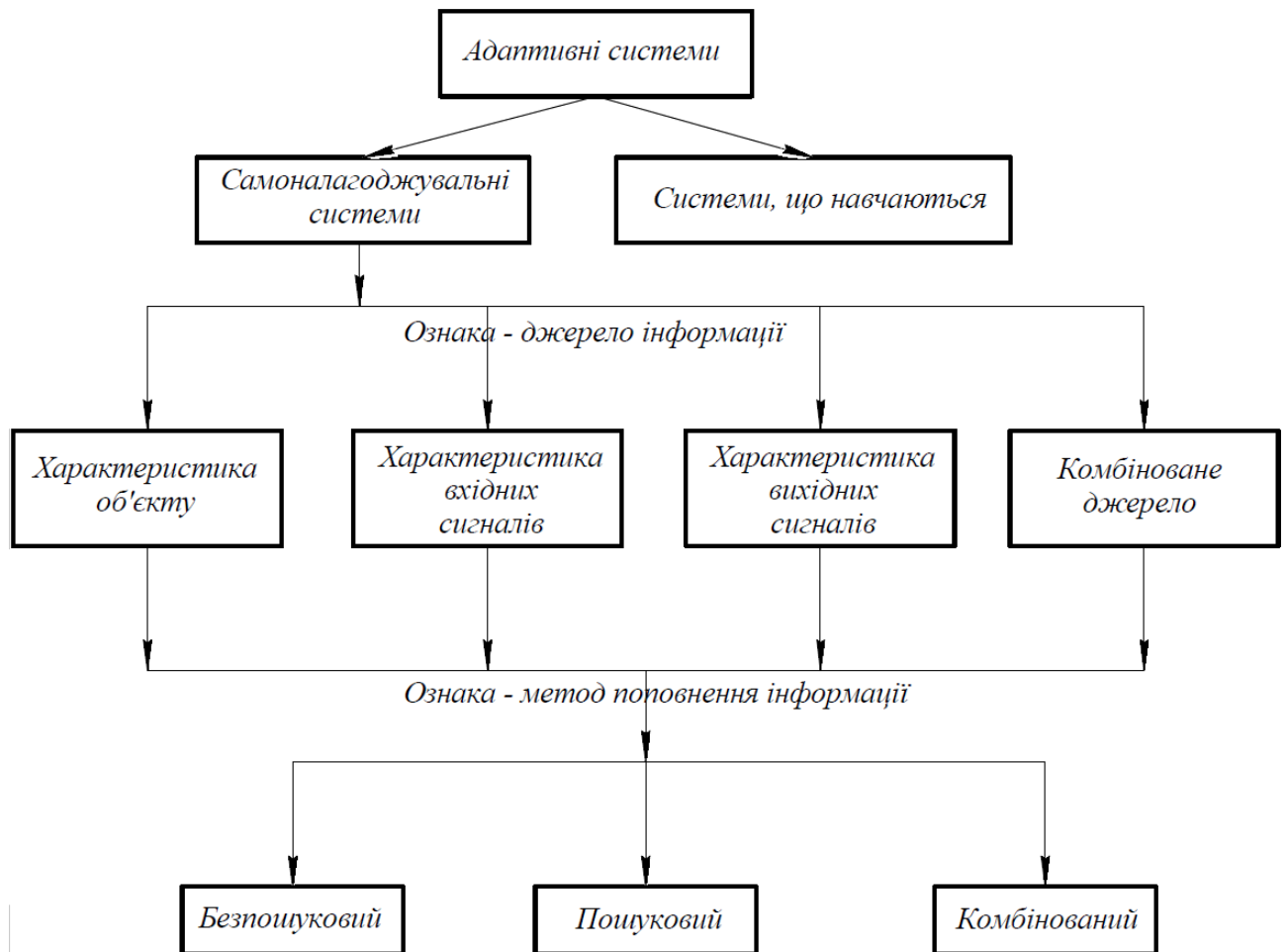


Рис.1.2. Класифікація адаптивних систем

Широке поширення при оптимізації складних технологічних процесів у вихідні величини отримали системи автоматичної оптимізації, в яких екстремізується в загальному випадку деякий функціонал Q від вихідних змінних об'єкта [8].

Оскільки значення функціоналу визначається всією сукупністю збурень, тобто

$$Q = Q(U, V, F), \quad (1.1)$$

то екстремізація функціоналу Q при даних V і F зводиться до знаходження такого рівняння U , при якому варіація функціонала, викликаних варіаціями U , дорівнює нулю, причому на рівняння зазвичай накладається обмеження виду

$$H(U) \leq 0. \quad (1.2)$$

У тих випадках, коли вдається при формулюванні завдання керування вибрати критерій оптимальності Q у вигляді функції від керування, необхідні умови екстремуму можуть бути записані в виду рівності

$$\frac{\partial Q}{\partial u_t} = 0, \quad (1.3)$$

тобто по суті ознакою досягнення екстремуму є рівність нулю градієнта функції [8].

Серед автоматичної оптимізації поширення набули екстремальні системи, в яких величини u виступають або в ролі регулюючих впливів, або в ролі установок регулятора. Екстремізація зазвичай проводиться шляхом варіації не всіх U , а тих, які найбільш сильно впливають на величину Q , що значно спрощує реалізацію автоматичного оптимізатора.

Найбільшого поширення набули екстремальні системи пошукового типу, які широко розглянуті в [9,10,11].

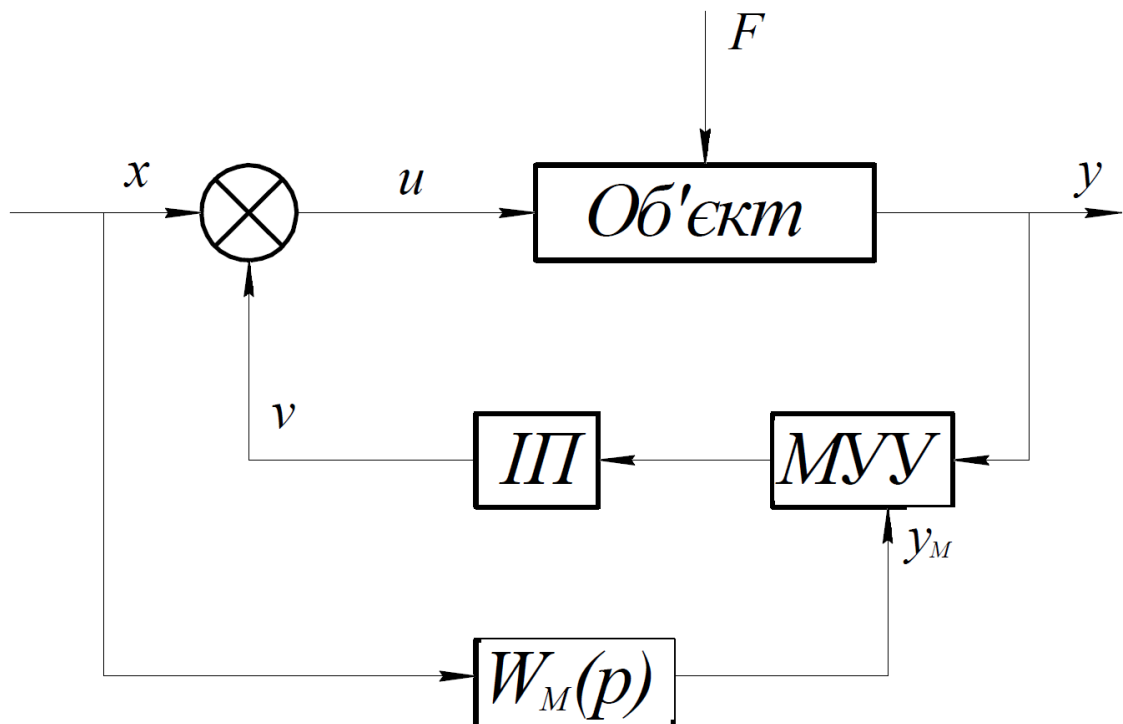


Рис.1.3. Екстремальна система пошукового типу

Приклад такої системи наведено на Рис.1.3. Випадкові або регулярні зміни центрованої величини U , наявні в системі, подаються на динамічну модель об'єкта. Середнє значення величин y_m і y , пропорційне величині Q

надходить на інтегруючий пристрій, вихідна змінна якого змінюється до тих пір, поки не буде досягнута величина U^* . У точці екстремуму середнє значення у дорівнює нулю, і подальшої зміни налаштування не відбувається [9].

1.2. Аналіз методів адаптивного керування

Шляхи побудови АСК металообробкою з урахуванням інформаційних ознак і структур керування відображені на Рис.1.4 [8].

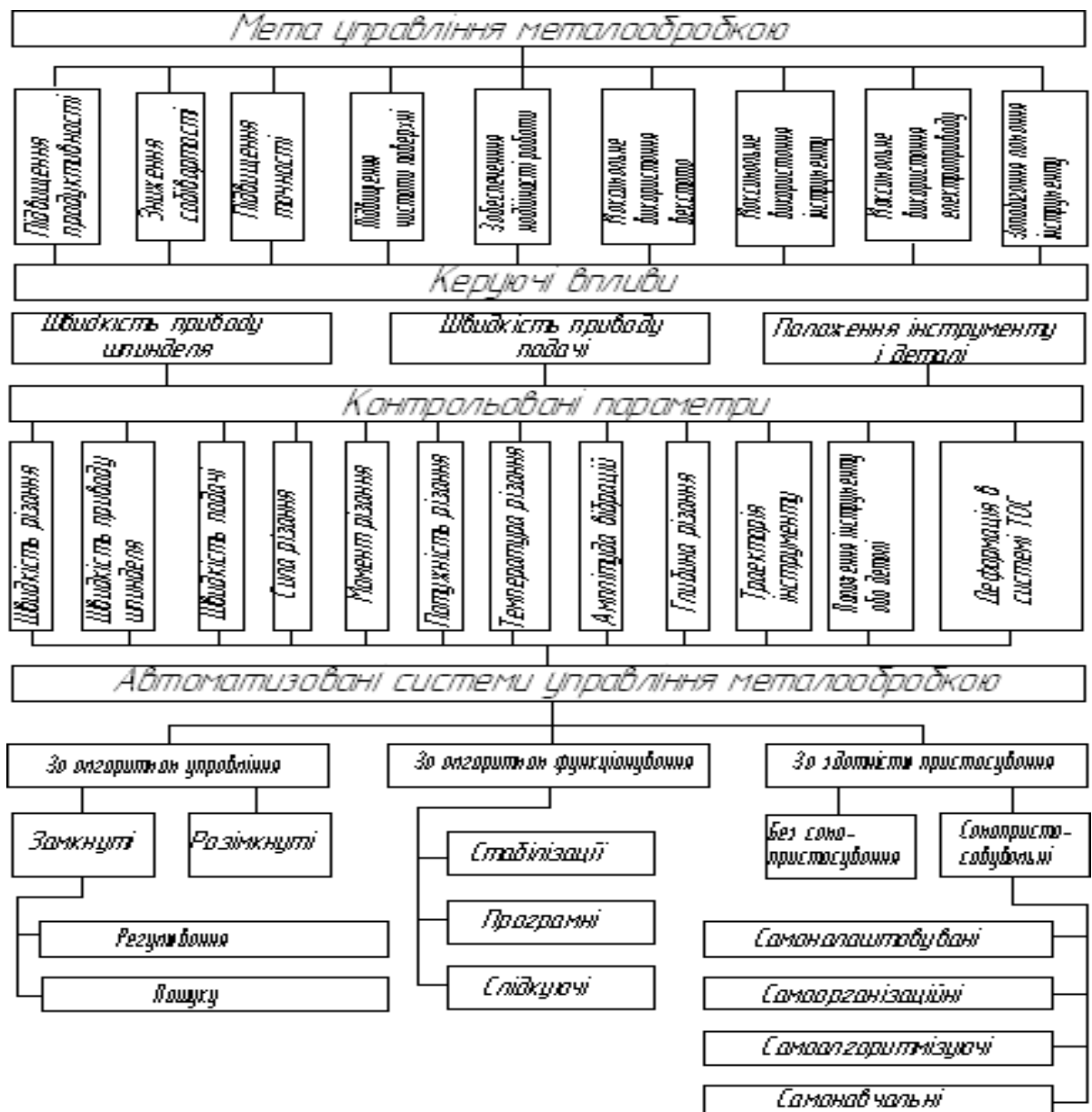


Рис.1.4. Класифікація систем керування металообробкою

АСК металообробкою забезпечує автоматизоване керування процесом різання. Метою такого керування може бути підвищення продуктивності

верстату, зниження собівартості, покращення точності, підвищення чистоти оброблюваної поверхні, забезпечення надійності роботи, максимальне використання технологічних можливостей верстату, різального інструменту, запобігання поломок інструменту та ін.

Показник якості АСК визначається одним з перерахованих вище факторів чи їх сукупністю. Зазвичай, показник якості встановлюється по компромісному рішенню. Досягнути необхідного показника якості АСК можливо за допомогою зміни керуючих впливів: швидкості приводу головного руху, швидкості приводу подачі, положення інструменту відносно деталі. За допомогою цих впливів здійснюється керування процесом обробки.

Поточну інформацію про режими різання і вироблення сигналів керування, що відповідають прийнятому показнику якості, отримують за допомогою контролю параметрів, що вказані на Рис.1.4. Для формування сигналів, пропорційних цим параметрам, АСК повинна бути забезпечена датчиками поточної інформації [8].

Особливістю АСК металообробки є системи обмеження параметрів процесу різання. Ці системи займають проміжне положення між АСК із замкнутим та розімкнутим ланцюгом керування. Замкнення зворотного зв'язку і вироблення сигналу керування здійснюється тільки після перевищення контрольованим параметром заданої величини.

Аналіз процесу утворення похибки контурної обробки на верстатах і її складових показує, що автоматичне керування можна проводити за рахунок корекції еквідистанти або керуванням режимами різання з метою стабілізації або компенсації збурень. Застосовують також комбіновані методи, які поєднують керування режимами обробки з корекцією еквідистанти. За характером застосовуваної інформації методи автоматичного керування можна поділити на методи, що використовують апріорну, поточну та апостеріорну інформацію [6].

Корекція еквідистанти за поточною інформацією. Цей метод автоматичного керування застосовується з метою підвищення точності обробки

і реалізується за допомогою САУ, що управляється за помилкою. Згідно з узагальненою функціональною схемою (Рис.1.5) це керування здійснюється за вектором заданого відносного формоутворюючого руху відповідно по кожній координаті, що управляється. На Рис.1.5 наведено схему керування за цим методом в напрямку однієї координати X , що управляється.

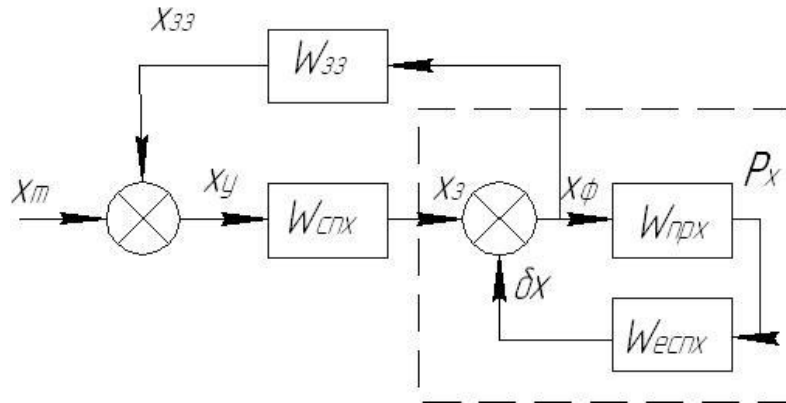


Рис.1.5. Схема керування за поточною інформацією

Процес різання в замкненій технологічній системі спрощено представлений елементами, що виділені штриховою лінією. При зображенні схем керування використовуються наступні позначення: x_z, x_ϕ - задане і фактичне значення параметру, що управляється, $W_{прх}$ - передатна функція процесу різання за параметром, що управляється, $W_{есх}$ - передатна функція еквівалентної пружної системи за напрямом координати X , P_x - відповідна складова силового параметру різання, δ_x - пружні деформації ЕПС у напрямку координати X .

При контурній обробці процес різання є квазістаціонарним, що обумовлюється модифікацією передатних функцій процесу різання і еквівалентної пружної системи за керованою координатою в широкому діапазоні. Це призводить до змінної деформації за всіма координатами і змінної похибки обробки.

Якщо вдасться отримати достовірну інформацію про миттєве значення похибки безпосередньо в місці обробки, то можна побудувати САУ, що коректує теоретичну (задану) координату x_m траєкторії відносного

формоутворюючого руху за результатами порівняння її з фактичною координатою, що вимірюється по каналах зворотного зв'язку: $x_y = x_m - x_{33}$. Така САУ складається з приводу формоутворюючого руху (W_{cpx}), що управляється і вимірювального приладу зворотного зв'язку (W_{33}). Система при функціонуванні не використовує жодної апіорної інформації про процес різання, яким вона управляє, проте для вибору її параметрів, що забезпечують сталу і якісну роботу необхідні деякі відомості про математичну модель об'єкта. Передатна функція САУ, за якою проводять розрахунок параметрів, котрі повинні забезпечувати сталу роботу системи, має вигляд [6]

$$W_{CAU} = \frac{W_{Cpx}}{1 + W_{EPCx} W_{PPx} + W_{33x} W_{Cpx}} \quad (1.4)$$

При цьому необхідно оцінювати САУ за швидкодією, аби вона не була фактором, що обмежує продуктивність. При низьких швидкостях формоутворюючого руху і при технічній можливості безперервно вимірювати фактичну координату безпосередньо на верстаті, такі САУ мають високу ефективність, бо автоматично компенсують дію всіх збурень в ланцюзі, що охоплений зворотним зв'язком [6].

Корекція еквідистанти за апіорною інформацією. Апіорна інформація про процес обробки міститься у передатних функціях W_{npx} і W_{enpx} , що були заздалегідь детерміновані. Ці передатні функції повністю визначаються геометричними параметрами оброблюваної поверхні, умовами різання, радіусом інструмента, жорсткістю, і масами ЕПС, а також іншими, наперед відомими параметрами.

Сутність корекції еквідистанти полягає в тому, що на основі вивчення процесу формоутворення, що проходить в замкненій технологічній системі, визначають передбачувану модифікацію передатних функцій W_{npx} і W_{enpx} та розраховують задане переміщення x_z за координатою, що управляється так,

щоб при різанні забезпечувався збіг фактичного x_ϕ переміщення з теоретичним x_m , тобто заданим кресленням. Зі структурної схеми (рис.2.5) маємо [6]

$$x_\phi = x_m \frac{1}{1 + W_{ЕПСx} W_{ПРх}} \quad (1.5)$$

Проте в результаті корекції необхідно забезпечити $x_\phi = x_m W_k$. Корекція досягається введенням в канал регулювання елемента, що коректує, з передатною функцією W_k .

$$x_\phi = x_m W_k \quad (1.6)$$

Підставивши (1.5) в (1.6), отримаємо:

$$x_m = x_m \frac{W_k}{1 + W_{ЕПСx} W_{ПРх}} \quad (1.7)$$

З виразу (1.7) ясно, що для виконання рівності необхідно взяти

$$W_k = 1 + W_{ЕПСx} W_{ПРх} \quad (1.8)$$

Така передатна функція відповідає сполученню елементів, показаному на рис.1.5. Елемент, що коректує, повинен бути реалізований при підготовці програми керування заданим переміщенням за відповідною координатою.

Система керування є розімкненою і тому її ефективність цілком залежить від точності апіорної інформації. Така САУ значно простіше розглянутої вище, не вимагає встановлення вимірювального приладу зворотного зв'язку і є достатньо ефективним засобом керування процесами контурної обробки (Рис.1.6) [6].

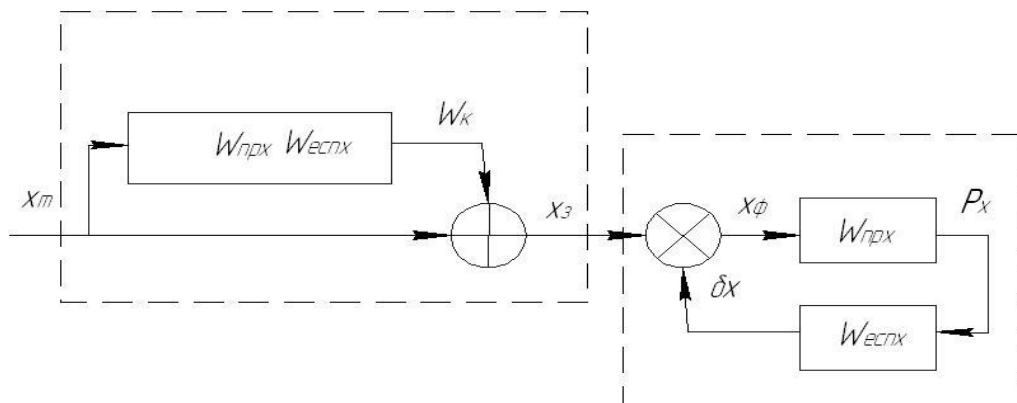


Рис.1.6. Схема керування за апіорною інформацією

Корекція еквідистанти за апостеріорною інформацією. Згідно з цим методом поточна корекція виробляється за результатами вимірювання вже обробленої деталі і, отже, із запізненням на один цикл обробки (Рис.1.7). Такий метод керування точністю широко застосовується при обробці простих поверхонь і там він відомий під назвою автоналагоджування, що припускає автоматичну корекцію позиції інструмента на величину очікуваної похибки обробки [6].

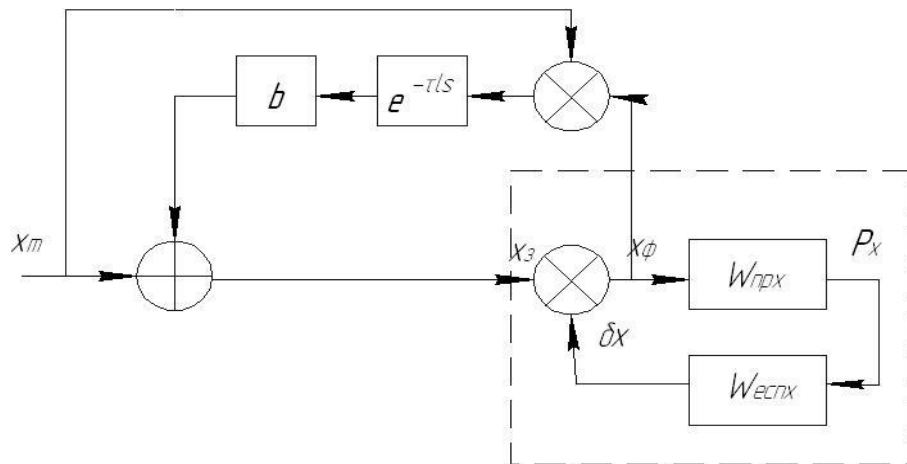


Рис.1.7. Схема керування за апостеріорною інформацією

При обробці складних поверхонь необхідно коректувати не положення інструмента як постійну величину, що не залежить від поточної координати, а траєкторію відносного формоутворюючого руху. Таким чином, йдеться про корекцію функції в залежності від координати, що задається і номера циклу обробки від початку процесу. Оскільки передатні функції $W_{\phi x}$ та $W_{\epsilon x}$ при обробці складних поверхонь можуть змінюватися навіть при обробці ділянок постійної кривизни, ця корекція повинна бути безперервною і охоплювати весь діапазон модифікації координати, що задається. Вказані особливості процесу вносять суттєві модифікації в відомий метод автоналагоджування, що застосовується при обробці простих поверхонь.

Залежність, яка використовується для корекції згідно з методом автоналагоджування є окремим випадком більш загальної залежності, що набуває вигляду функції координати ϕ оброблюваної поверхні, котра задається [6]

$$u_n(\phi) = bx_{n-1}^*(\phi), \quad (1.9)$$

де $u_n(\phi)$ - налагоджувальна функція в n -му циклі, b - коефіцієнт налагоджування, $x_{n-1}^*(\phi)$ - функція відхилення контуру деталі, обробленої в $n-1$ циклі.

Визначення коефіцієнта налагоджування можна проводити за методом спрощеної оцінки імітаційним моделюванням на ЕОМ згідно з моделлю

$$\begin{cases} x_n^*(\phi) = x_n(\phi) - b\phi \sum_{j=1}^{n-1} x_j^*, \\ x_1^*(\phi) = x_1(\phi) \end{cases} \quad (1.10).$$

Виконуючи імітаційне моделювання для одного і того ж набору значень $x_n(\phi)$, при одному і тому ж значенні координати, що задається ϕ , але для різних b ($b = 0.1 \dots 0.9$), обчислюють для кожного значення b середнє відхилення розмірів \bar{x}^* і дисперсію σ_x^{2*}

$$\begin{aligned} \bar{x}^* &= \frac{1}{N - N_k} \sum_{k=N_k}^N x_k^*; \\ \sigma_x^{2*} &= \frac{1}{N - N_k} \sum_{k=N_k}^N \left[(x_k^*)^2 - (\bar{x}^*)^2 \right] \end{aligned} \quad (1.11)$$

Після цього цикл обчислень повторюють для інших значень ϕ з вибраним кроком модифікації згідно з прийнятою схемою обробки, або заздалегідь визначають найбільш відповідальні ділянки контуру, які відрізняються жорсткими допусками і найбільш напруженими умовами обробки. Оптимальне значення коефіцієнта b знаходять за екстремумом залежності (1.11).

Рекомендовано прийняти діапазон значень коефіцієнта під налагоджування $0.5 \leq b \leq 0.7$. Збільшення даного коефіцієнта може призвести до втрати сталості усього процесу керування.

Для реалізації методу при керуванні процесом обробки необхідно вимірювати контур кожного обробленого перерізу складної поверхні, причому вимірювання бажано проводити за тією ж схемою, що й при обробці деталі. Ці

надто трудомісткі операції можна автоматизувати за допомогою контрольно-вимірювальних машин (КВМ), оснащених системами ЧПУ. При обробці на верстатах з ЧПУ контроль можна виконувати і безпосередньо на верстаті, де була оброблена деталь. Для цього за допомогою вимірювального щупа, встановленого в інструментальний шпиндель, здійснюють обхід контуру по спеціальній програмі, яка враховує різницю між діаметром інструмента та діаметром щупа. Кількість контактів вимірювального щупа і їх розташування відповідає кількості вимірювальних координат.

Методом корекції еквідистанти за апостеріорною інформацією можна компенсувати всі систематичні складові похибки і навіть дещо зменшити дисперсію випадкової складової. Істотним недоліком методу є необхідність виконання декількох циклів обробки для виходу на режим роботи, що встановився, що робить його застосування доцільним тільки в умовах серійного виробництва.

При індивідуальному виробництві використовують модифікації цього методу керування. Виконують пробний прохід з глибиною шару, що зрізується, рівним, наприклад, половині припуску. Після цього, не знімаючи деталь з верстата, проводять необхідні вимірювання, одержуючи масив значень функції, що оброблюється на ЕОМ разом із масивом теоретичного контуру. В результаті на наступному проході обробку ведуть вже за скоректованою таким чином траєкторією [6].

1.3. Критерій оптимізації

Важливим моментом при вирішенні завдань оптимального керування є задання критерію якості керування. У загальному випадку можна вважати, що керування є високоякісним при досягненні екстремуму деякого функціоналу [11]:

$$I(Y^*, U^*, V, F, t) = \text{extr } I \quad (1.12)$$

В якостей критерію I можуть бути взяті різні технічні або економічні показники. Для більшості технологічних процесів - це собівартість цільового продукту, яка повинна мінімізуватися, продуктивність виготовлення та інше. Оптимальний режим досягається шляхом вибору керуючого впливу, що забезпечує екстремум функціоналу (1.12).

При синтезі оптимального керування складними технологічними об'єктами необхідно врахувати такі особливості [11]:

- 1) область допустимих значень є замкнутою, тобто на керуючі впливи існують обмеження
- 2) можуть бути встановлені обмеження на вихідні змінні
- 3) керування завжди має вартість
- 4) в ряді випадків не можна ставити завдання оптимізації процесу в кожен даний момент часу, а треба проводити оптимізацію за загальний час.

В силу зазначених особливостей критерій для складних технологічних процесів, що описуються системою звичайних диференціальних рівнянь, вибирається у вигляді функціоналу [11]

$$I = \beta_1 g(Y_0, Y_\tau, T) + \beta_2 \int_0^T G(Y, U, t) dt \quad (1.13)$$

де β - вагові коефіцієнти, G - деякі функції, Y - вектори стану процесу відповідно в початковий і кінцевий моменти часу.

При вирішенні завдання (1.13) в сенсі керування зазвичай відомо початковий стан процесу і бажаний протягом процесу. Необхідно також з'ясувати, чи можна цей процес перевести за кінцеву кількість часу з початкового стану в бажаний. Повна керованість доведена для лінійних стійких і нейтральних систем, для нелінійних систем керованість неповна. Рішення проблеми керованості для кожного конкретного процесу можливо за допомогою методу л-проблеми моментів [11].

Залежно від того задано час T чи ні, можна розділити завдання оптимального керування на два [11]:

1) якщо час T не задано, то завдання оптимізації полягає у виборі оптимального керування мінімізацією часу і вартості переходу в бажаний стан з початкового.

2) якщо час T задано, то точне попадання в бажаний стан не гарантоване, при цьому необхідно мінімізувати «не дохід».

Реалізація зазначених методів оптимізації на складних технологічних об'єктах викликає певні складнощі, тому що вони пов'язані з необхідністю вирішення варіаційної задачі в умовах неповної визначеності. Тому доцільно оптимізацію здійснювати за допомогою двоконтурних систем [11].

1.4. Схема функціонування та алгоритм роботи адаптивної системи керування

При керуванні будь-яким об'єктом, в тому числі без участі людини, забезпечується постійність певної фізичної або іншої величини, що характеризує стан об'єкту, або зміну цієї величини у відповідності до деяких законів на основі конкретної інформації про стан об'єкту та оточуючого середовища. Здійснюється це за допомогою автоматизованої системи керування(АСК) [8].

Автоматизована система керування складається з двох основних частин: об'єкта керування та управляючого пристрою.

Стан об'єкта керування залежить від прикладених до нього впливів $g(t)$ та від власних параметрів, тому характеризується величиною $y(t)$.

Вплив $g(t)$, що поступає на вхід управляючого пристрою і містить інформацію про необхідне значення $y(t)$, називається впливом, який задається.

Вплив $z(t)$, що поступає від управляючого пристрою на вхід об'єкта для забезпечення в ньому необхідного процесу, називається управляючим впливом.

Вплив $f(t)$, прикладений до об'єкта і викликаючий відхилення керованого параметра від заданого значення, називається збурюючим впливом (перешкодою).

На Рис.1.7 приведена класична функціональна схема АСК, на якій показані основні елементи управляючого пристрою(УП) [9].

Вплив $g(t)$, який задається, є вхідним сигналом АСК і визначає закон зміни вихідного сигналу $y(t)$, поступає на чутливий елемент (ЧЕ). Крім того на цей елемент подаються сигнали зворотного зв'язку $y(t)$ та збурюючого впливу $f(t)$.

З виходу ЧЕ сигнал $x(t)$, що є функцією впливу $\{g, y, f\}$ і характеризує похибку (неузгодженість) АСК, підсилюється підсилювачем (П) та поступає на виконавчий механізм (ВМ).

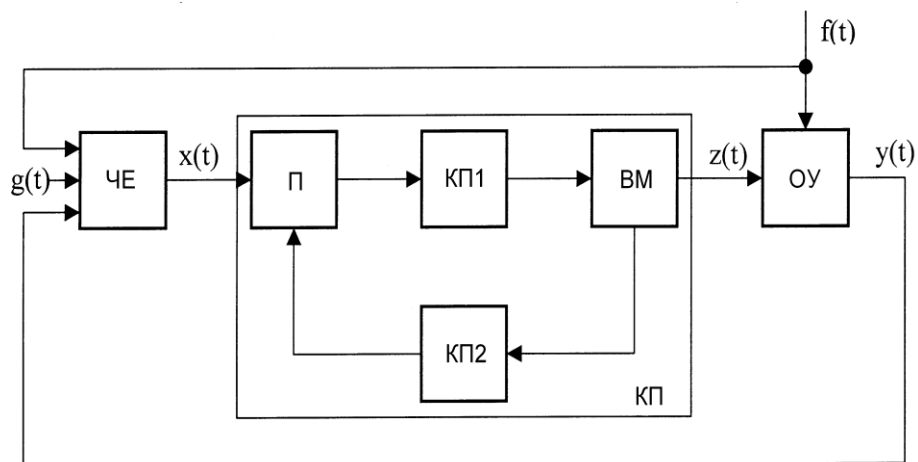


Рис.1.7. Функціональна схема АСК

ВМ виробляє та подає на об'єкт керування (ОУ) керуючий вплив $z(t)$.

Іноді при формуванні керуючого впливу крім сигналу похибки враховуються його похідна та інтеграл.

Часто для забезпечення потрібних статичних та динамічних характеристик системи використовуються коректуючі пристрої: послідовні (КП1) та паралельні (КП2).

В склад АСК можуть входити ще й спеціальні елементи для узгодження окремих частин системи, а також обчислювальні пристрої для реалізації алгоритму роботи керуючого пристрою [9].

Очевидно, що АСК є більш загальним поняттям, ніж адаптивні АСК складними системами. Тому в змістовній постановці задачі синтезу ААСК існує

ряд особливостей та специфічних проблем, що виникають саме тоді, коли об'єктом керування є складна система [11].

Зазвичай поняття «параметри об'єкта керування» і «стан об'єкта керування» розглядаються як синоніми, причому ця обставина спеціально не уточнюється. Через це вважається, що АСК управляють станами об'єкта керування, хоча фактично під цим розуміється лише керування його параметрами.

Рішення про керуючий вплив приймається в таких АСК «всліпу», тобто без формування цілісного образу об'єкта керування і оточуючого середовища, а також без прогнозування розвитку середовища та реакції об'єкта керування на ті чи інші керуючі впливи на нього, що діють одночасно з прогнозованим впливом середовища. [11]

У випадку, коли параметри об'єкта керування детерміновані і однозначно пов'язані з його станами, такий підхід є адекватним.

В даній роботі параметри об'єкта керування розглядаються як зовнішній прояв його стану, так як в загальному випадку об'єкт керування представляє собою складну систему, в якій зв'язок між параметрами, за якими спостерігають, та станом системи має складний та неоднозначний характер.

Тому, коли об'єкт керування є складною системою, підхід до керування в АСК, що базується на керуванні по параметрам, стає неадекватним. В цьому випадку вироблення керуючого впливу повинно здійснюватися на основі даних про поточний стан об'єкта керування [11].

В моделі складного об'єкта керування, що сформована в адаптивній АСК, міститься узагальнена фактична інформація про те, які керуючі впливи раніше на практиці переводили складний об'єкт керування в такому поточному стані і з такою передісторією в заданий цільовий стан. На основі даної інформації і приймається рішення про вибір керуючого впливу.

Одразу слід зазначити, що термін «прийняття рішень» навряд чи в повній мірі може використовуватись для традиційних АСК. Справа в тому, що «прийняття рішень», як мінімум, припускає цілісне бачення об'єкта в

оточуючому середовищі, причому не тільки в актуальному (поточному) стані, але й в динаміці і у взаємодії як один з одним, так і з системою керування, що передбачає розгляд різних альтернативних варіантів розвитку всієї цієї системи, а також звуження різноманіття (редукцію) даних альтернатив на основі певних цільових критеріїв шляхом використання певних керуючих впливів [11].

Звичайно, традиційний метод є адекватним і його використання цілком коректне і виправдане в тих випадках, коли об'єкт керування дійсно є стабільною та чітко детермінованою системою, а впливом зовнішнього середовища на нього можна знехтувати.

Однак у випадках, коли об'єкт керування представляє собою складну систему, традиційний метод стає малоефективним.

Причина полягає в тому, що якщо об'єкт керування динамічний, як представлено в нашому випадку, то моделі, що лежать в основі алгоритмів керування ним, швидко стають неадекватними, так як змінюються відношення між вхідними та вихідними параметрами, і сам набір суттєвих параметрів також. По суті, це означає, що традиційні АСК здатні керувати станом об'єкту лише поблизу точки рівноваги шляхом слабких керуючих впливів на нього, тобто методом малих збурень. При віддаленні від стану рівноваги з традиційної точки зору поведінка об'єкту керування виглядає не прогнозованою та некерованою.

В результаті АСК, що ґрунтуються на детерміністичному підході, практично не працюють з великими складними динамічними багато параметричними об'єктами керування, як, наприклад, макро- та мікроекономічні системи, природні та штучні екосистеми, великі і складні технічні системи. Якщо не існує однозначного зв'язку між вхідними та вихідними параметрами об'єкта керування, іншими словами, якщо цей зв'язок має виражений імовірнісний характер, то детерміновані моделі, в яких припускається, що результатом вимірювання певного параметра буде просто число, від початку не застосовуються. Крім того, у випадку керування складними системами вид цього зв'язку може бути просто невідомим, і тоді

необхідно виходити з самого загального припущення про те, що вона імовірнісна (стохастична), визначати і уточнювати вид даного зв'язку безпосередньо в процесі експлуатації АСК.

Таким чином, принципи керування і вироблення рішення про керуючий вплив, що використовується в традиційних АСК, не є адекватними в даному випадку, коли об'єкт керування представляє собою складну систему.

Основна проблема полягає в тому, що традиційні АСК працюють на основі параметрів об'єкта керування, закономірності зв'язків яких уже відомі, вивчені та відображені в математичній моделі, у випадку ж складних об'єктів керування створити таку модель на основі апіорної інформації про об'єкт керування досить важко [11].

Проведемо порівняння типової АСК та адаптивної АСК СС.

Розглянемо типову структуру АСК (Рис.1.8), що функціонує в певному зовнішньому середовищі, що є спільним і для суб'єкта, і для об'єкта керування.

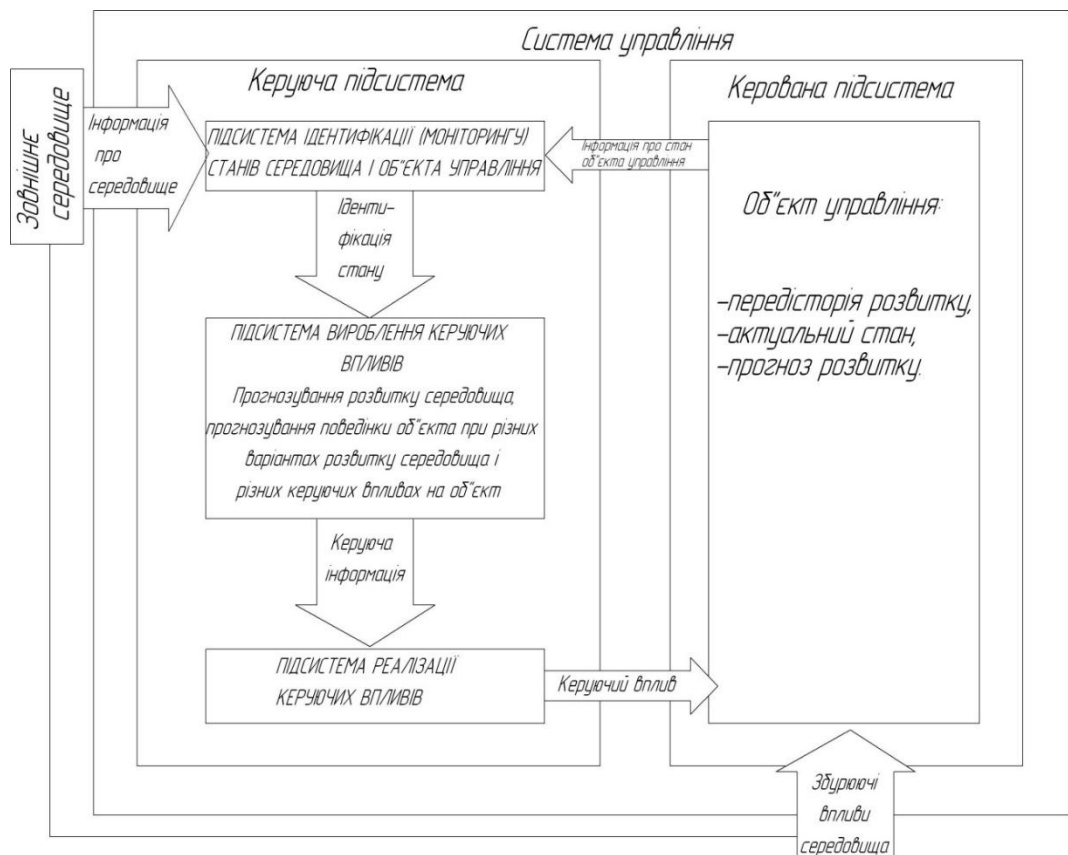


Рис.1.8. Структура АСК

Конкретизуємо типову структуру АСК, використовуючи уявлення про вхідні та вихідні параметри об'єкта керування. В результаті отримаємо параметричну модель адаптивної АСК складними системами (Рис 1.9).

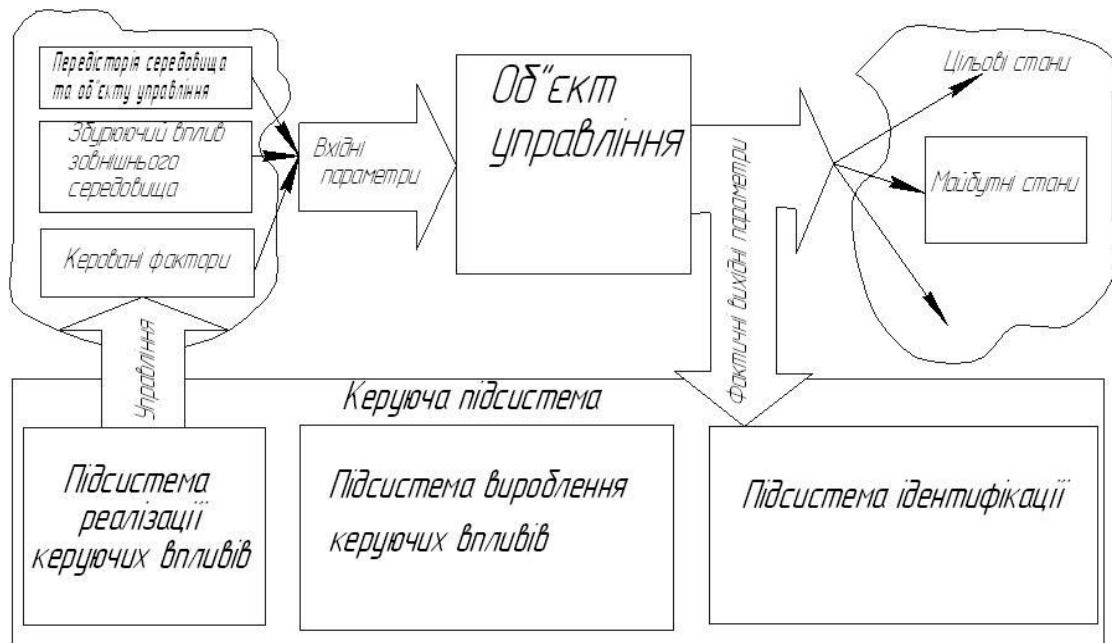


Рис. 1.9. Параметрична модель адаптивної АСК складними системами

Вхідні параметри \vec{X} поділяються на наступні групи [11]:

- T_i , які характеризують передісторію середовища та об'єкта керування;
- T_i , які характеризують актуальний стан середовища та об'єкта керування;
- Технологічні (керовані) параметри;
- Некеровані параметри, що не залежать від людини.

Вихідні параметри \vec{Y} - це властивості об'єкта керування, що залежать від вхідних параметрів (в тому числі, параметрів, що характеризують середовище)

$$\vec{Y} = Y(\vec{X})$$

В автоматизованих системах параметричного керування ціллю керування є отримання певних значень вихідних параметрів об'єкта керування [11].

Однак, як було вказано раніше, у випадку складного об'єкта керування (СОУ), необхідно ввести поняття «стан об'єкта керування», так як вихідні параметри СОУ зв'язані з його станом складним та неоднозначним способом

$$\vec{T} = T(\vec{Y}).$$

Висновки до розділу

1. Проведено критичний аналіз засобів та методів адаптивного керування, щоб визначити найкращі з існуючих та встановлено, що найкращими є системи, які навчаються у процесі керування, тому що половина джерел інформації поступає на неї у процесі різання, що робить можливим прогнозування певних процесів на основі досліджених тенденцій.

2. Розглянувши основні методи адаптивного керування. було обрано метод коректування еквідистанти за апостеріорною інформацією, яка буде отримуватись від датчиків та використовуватись для подальшого прогнозу. За допомогою критерію оптимізації можливо буде здійснити оптимальне керування процесом обробки шляхом максимізації (мінімізації) ключового параметру, якого необхідно досягти.

3. Розглянуто схему функціонування адаптивної системи керування та алгоритм її роботи та взято його за основу.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ БЕЗЛЮДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

2.1. Фізичні основи процесу різання

Розвиток сучасного виробництва іде шляхом створення високоефективних промислових установок, що забезпечують інтенсифікацію технологічних процесів і систем керування ними. При цьому поступово було здійснено перехід від ручного керування технологічними процесами до автоматизованих і далі – до автоматичних [12].

Для керування процесом механічної обробки деталей в умовах «безлюдної технології» необхідно перш за все розглянути сам процес та його модель.

Процес механічної обробки металів різанням представляє собою складний багатопараметричний процес з великою кількістю вхідних та вихідних характеристик, що відбувається в ТОС, яка в свою чергу є складною пружно-динамічною замкнутою системою: верстат – пристосування – інструмент – деталь, що значно впливає на процес механічної обробки. Безпосередньо сам процес різання є складним функціональним перетворюючим процесом у вигляді силового тертя, пружного та термопластичного деформування і руйнування матеріалу, де всі вхідні характеристики перетворюються різанням в ряд вихідних, що охоплюють якісні, фізико – механічні та техніко–економічні параметри процесу механічної обробки [12].

Для формулювання задач, пов'язаних з проектуванням та вибором методів розрахунку систем автоматизованого керування обробкою, необхідно зупинитися на фізичній сутності самого технологічного процесу і встановити причини та закономірності явищ, якими він супроводжується. Об'єктом керування для системи є верстат разом з процесом різання. На вихідних

характеристиках об'єкта відображаються зміни параметрів як об'єкту керування, так і керуючого пристрою [13].

Оптимізація процесу обробки деталей вимагає чіткого визначення критерію, за яким буде проводитись процес оптимізації і керування, і вибору стратегії керування, що забезпечує досягнення максимуму або мінімуму даного критерію [14].

Відхилення розмірів деталей від вказаних на кресленні при обробці на верстатах відбувається через похибки, які обумовлені недосконалістю інструменту і робочих механізмів, механічної частини верстату, а також через похибки, пов'язані з системою керування. Розглянемо детальніше складові похибок, розділивши їх в першу чергу на похибки керуючого пристрою та похибки об'єкта керування.

Похибки керуючого пристрою складаються з трьох складових [12]:

1. похибок об'єкта керування,
2. похибок програми.

Похибку програми можна, в свою чергу, поділити на похибку апроксимації та похибку, пов'язану з дискретизацією.

Зупинимось детальніше на похибках об'єкта керування, який є специфічним як з точки зору технологічного процесу, так і з точки зору виду навантаження на приводи. Одна з основних частин об'єкта керування – процес різання – є складним фізичним процесом, при якому мають місце пружні та пластичні деформації. Він супроводжується силовим тертям, зношуванням різального інструменту, усадкою стружки, тепловиділенням, наростоутворенням [13].

Теоретично та експериментально показано, що на складові сили різання впливають в основному режими різання, передній кут різця, головний кут в плані різця, радіус закруглення при вершині різця, склад змазувально-охолоджуючих рідин та ступінь зношування різальної кромки різця [15].

Під дією сили різання підвищується температура компонентів ТОС.

Виділяючись в зоні стружкоутворення і в місцях контакту стружки з інструментом та інструменту з заготовкою, тепло дає досить великий вплив на стан поверхонь тертя, на точність обробки, стійкість різця, на весь процес різання і пов'язані з ним явища [16].

Процес різання здійснюється в результаті комбінації як мінімум двох рухів робочих механізмів верстату. Характеристики цих рухів разом з компонентами системи ТОС визначають силовий та тепловий режими процесу різання [16].

Розглянемо змінні величини, що пов'язані з роботою об'єкта керування і визначають вимоги до керуючого пристрою.

Всі змінні можуть бути поділені в залежності від їх ролі в процесі різання на вхідні, керуючі та вихідні [14].

Під вхідними змінними параметрами μ_i розуміють сукупність показників, що характеризують технічні характеристики пристосувань, матеріал і розміри заготовки, характеристики інструменту (наприклад, довжину l), верстату, внутрішні та зовнішні зв'язки між компонентами системи ТОС (такі як сила різання F_z , крутний момент $M_{кр}$, амплітуда вібрацій ξ). До цієї групи відносяться наступні параметри об'єкта керування: пружні деформації системи ТОС, твердість матеріалу заготовки, припуск на обробку деталі, нагрів ЗОТС, вібрації компонентів системи ТОС [14].

Значення кожного вхідного параметра знаходяться в інтервалі, що заданий технологічними допусками на процес різання [14]:

$$\mu_{i\min} \leq \mu_i \leq \mu_{i\max} . \quad (2.1)$$

Керуючі обробкою змінні: подача s_i , швидкість різання v_i , глибина (інколи ширина) різання t_i . Керуючі змінні також підлягають певним фізичним обмеженням. Такі обмеження є вібраціями в системі, економічна стійкість інструменту, температура в зоні різання і т.д [14].

$$s_{i\min} \leq s_i \leq s_{i\max} ; v_{i\min} \leq v_i \leq v_{i\max} ; t_{i\min} \leq t_i \leq t_{i\max} . \quad (2.2)$$

Нарешті, вихідні змінні повинні характеризувати техніко – економічні показники роботи верстату (об'єкта керування). Це можуть бути дані про швидкість утворення обробленої поверхні (про продуктивність), про рівень вібрації або величини, які характеризують всі ці показники та однозначно з ними пов'язані. Вихідні змінні також обмежені за величиною, наприклад [14]:

$$s_{li\min} \leq s_{li} \leq s_{li\max} . \quad (2.3)$$

Всі розглянуті змінні є контрольованими величинами, їх фізична природа в достатній мірі вивчена. Крім того, між якісними показниками об'єкта керування, його вхідними та вихідними змінними є сильна кореляційна залежність. Інколи її називають багатофакторною кореляційною залежністю, справедливою в обмеженій умовами (2.1)-(2.2) області з певною точністю та надійністю. Вона підтверджується статистичними дослідженнями впливу характеристик об'єкту керування на продуктивність, собівартість та інші вихідні показники.

Аналізуючи основні змінні, що беруть участь в технологічному процесі обробки деталей, можна сказати, що даний процес характеризується взаємопов'язаними змінними, які впливають як на перебіг виробничого процесу, так і на його результати [14].

Верстат з процесом різання можна віднести до складних багатоканальних об'єктів з наявністю взаємно-корельованих вхідних та вихідних змінних. Складність об'єкта керування проявляється в значному числі параметрів, що визначають перебіг процесу різання, у великій кількості внутрішніх зв'язків між параметрами, особливо в такому їх взаємному впливі, при якому зміна одного параметру викликає нелінійну зміну інших. Відмічена складність підсилюється виникненням зворотних зв'язків між параметрами, що змінюють перебіг процесу різання [15].

При розробці системи керування таким об'єктом виникає питання, чи не можна відкинути частину параметрів або замінити їх меншою кількістю функцій від них, зберігаючи при цьому потрібну інформацію. Такий підхід

практично виправданий ще й тому, що серед вхідних змінних можна виділити визначаючі, тобто можна не враховувати всю множину параметрів, а приймати до уваги тільки ті, впливи яких визначають характеристики об'єкта керування в робочій зоні. Наприклад, в пружній деформації системи ТОС часто найслабшою ланкою є інструмент. Для системи керування чорновими режимами обробки при цьому є достатнім врахувати вплив пружної деформації тільки інструменту. Вплив статичних характеристик як еквівалентних внутрішніх контурів систем.

При проектуванні безпошукових систем адаптивного керування задача вирішується шляхом створення еталонної моделі об'єкта керування з можливостями адаптації її до вхідних та керуючих змінних. Коректуючі впливи на модель обчислюються за допомогою мікроЕОМ в процесі обробки деталі і поступають разом з керуючим впливом при кожній новій операції обробки одночасно з новим кадром програми [15].

Стратегія керування верстатом разом із процесом обробки на ньому, побудована з використанням адаптивної моделі, повинна передбачати організацію керування по наступному ієрархічному принципу [15].

1. На верхньому рівні ієрархії обчислюють критерій керування, ідучи при цьому на компромісне рішення при виборі точності, продуктивності та собівартості, і видають завдання на пристосування регуляторів. Періодично на верхньому рівні в мікроЕОМ оброблюється статистичний матеріал з метою корекції як математичної моделі, так і рівня стабілізації параметрів.

2. На нижньому рівні ієрархії проводиться зміна керуючих змінних в цілях оптимізації технологічного процесу, що визначає вихідні властивості верстату. Ці зміни здійснюються по установкам, що видаються верхнім рівнем із умови екстремум критерію оптимізації.

Проектування і розрахунок системи керування нижчого порядку повинні включати задачі визначення різних її властивостей і характеристик: таких як стійкість, якість перехідного процесу, динамічна точність, надійність. При

цьому всі силові елементи розраховують за відомими методиками для слідкуючих приводів верстатів з УЧПУ.

Системи слідкуючих приводів з УЧПУ, що є внутрішнім контуром для системи керування обробкою, повинні мати можливість самостійного функціонування, тобто по жорсткій програмі. Такий режим роботи необхідний для наладки верстату та УЧПУ при їх стиковці, тому розрахунку внутрішнього контуру системи і питанням його проектування необхідно приділяти особливу увагу. Особливістю задачі є також та обставина, що системи, які проектуються, близькі за своєю будовою до імпульсних слідкуючих систем з цифровими керуючими машинами, повинні працювати в більшому діапазоні частот керуючих впливів при взаємодії зі складним об'єктом в умовах, коли функціонування системи базується на обробці і використанні інформації, отриманої під час самого технологічного процесу [15].

Металорізальний верстат, на якому проводиться процес різання є технологічним об'єктом керування. Точіння здійснюється на токарних верстатах за допомогою обертання оброблюваної деталі 1 (головний рух) і переміщення різця 2(рух подачі), як показано на рис.2.1 [16].

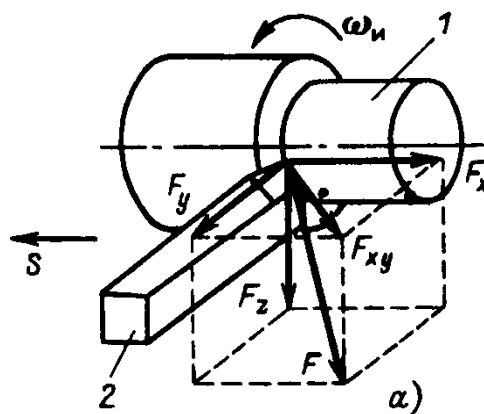


Рис.2.1.Схема токарної обробки

Обертова швидкість деталі в точці дотику різця з оброблюваною деталлю є швидкістю різання. Вона визначається за формулою [16]

$$v = 9,55\pi d_i \omega_i = 30d_i \omega_i \text{ (м/хв)},$$

Де d_i - діаметр обробки, ω_i - кутова швидкість деталі, рад/с.

Величина подачі визначається переміщенням різця, яке припадає на один оберт деталі. Глибина різання представляє собою різницю радіусів оброблюваної та обробленої поверхонь. Швидке переміщення супорта, затискання і відтискання оброблюваної деталі, переміщення люнета, задньої бабки та інші переміщення відносять до допоміжних.

Параметри обробки пов'язані між собою емпіричною формулою [16]

$$v = \frac{C_v}{T^m t_p^{x_v} s^{y_v}}, \quad (2.4)$$

Де C_v - коефіцієнт, що характеризує вид та умови обробки, а також матеріал деталі та різця, s - подача, мм/об; t_p - глибина різання, мм; T - стійкість, хв; x_v, y_v, m - показники степені, що залежать від властивостей оброблюваного металу, матеріалу різця і виду обробки.

При знятті стружки різцем виникає сила F , прикладена до ріжучої кромки інструмента, яка може бути розкладене (рис.2.2) на три складових [16]:

$$F = \sqrt{F_z^2 + F_y^2 + F_x^2},$$

Де F_z - головна дотична сила, що діє в напрямку траєкторії головного руху, яка переборюється шпинделем станка і називається зусиллям різання, F_y - радіальна сила, що діє нормально відносно обробленої поверхні і утворююча тиск на супорт, F_x - осьова сила, що діє у напрямку подачі.

Розрахунок зусилля різання проводиться по емпіричній формулі [16]

$$F_z = C_F t_p^{x_F} s^{y_F} v^n \quad (2.5)$$

де C_F - коефіцієнт, що характеризує матеріал деталі, різця і вид токарної обробки, x_F, y_F, n - показники степені.

Коефіцієнти і показники степені в (2.4) та (2.5) приймаються по довідникам режимів різання.

2.2. Види зношування та аналіз методів контролю процесу обробки

2.2.1. Аналіз критеріїв та видів зношення різального інструменту

Знос різального інструмента значно відрізняється від зносу деталей машин, оскільки зона різання, в якій працює інструмент, характеризується високою хімічною чистотою поверхонь що піддаються тертю, високими температурами та тиском в точці дотику [17].

Основною причиною затуплення інструмента при нормальних умовах роботи є знос в результаті стирання його робочих поверхонь. Такий знос характерний для всіх інструментів в металообробній промисловості [17].

В залежності від режимів різання, властивостей оброблюваного матеріалу, умов охолодження та інших факторів стирання контактних площадок може бути [18]:

- по задній і передній поверхнях (Рис.2.2, а);
- по задній поверхні (Рис.2.2, б);
- по передній поверхні (Рис.2.2, в).

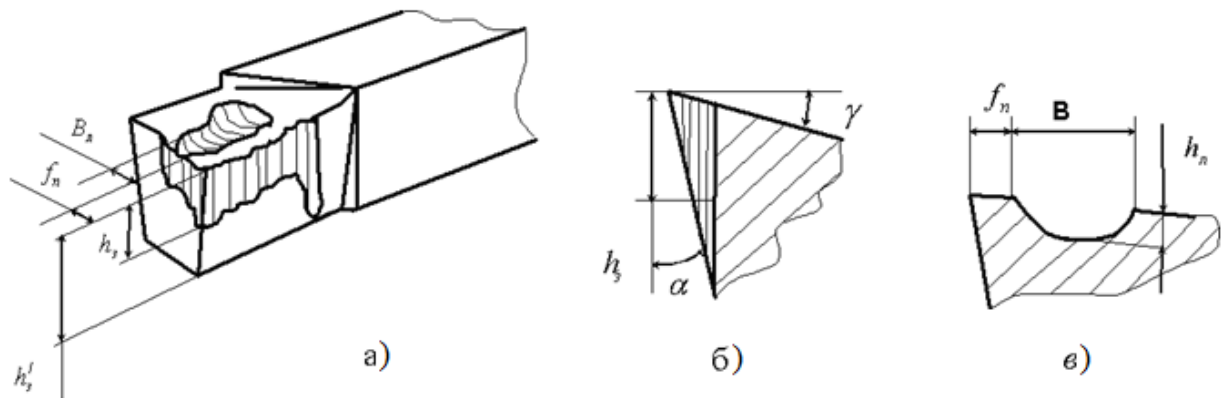


Рис.2.2. Розподіл зносу по поверхнях інструменту:

а - ріжуча частина інструменту зі слідами зносу; б - знос по задній поверхні; в - знос по передній поверхні.

Знос різального інструменту тільки по задній поверхні спостерігається при обробці крихких матеріалів, при різанні яких утворюється стружка надлому, яка не представляє собою суцільного міцного тіла. Знос по задній поверхні є також превалюючим у разі різання з малими товщинами зрізу, при малих значеннях задніх кутів і при обробці сталей і сплавів, що володіють

яскраво вираженим пружним наслідком і сильним оброблювальним зміцненням.

Знос різального інструменту тільки по передній поверхні відбувається в разі обробки в'язких металів з великими площами перерізу, коли утворюється стійкий наріст, що виключає контакт задньої поверхні з оброблюваним матеріалом. У більшості випадків практики різання металів, інструмент зношується як по передній, так і по задній поверхнях (Рис.2.2, а) [18].

Графічне зображення закономірності наростання величини зносу (Рис.2.3) за час роботи інструменту називається кривою зносу. В загальному випадку на кривій зносу можна виділити три ділянки: 1 - період припрацювання, або початкового зносу, тривалістю всього декілька хвилин. На цій ділянці спостерігається прискорений знос, що є наслідком стирання виступаючих ділянок вихідних нерівностей на заточеній поверхні інструменту; 2 - період нормального зносу. Він починається з того моменту, коли величина шорсткості стає невеликою. При цьому знос поступово збільшується приблизно пропорційно часу роботи інструменту (це найбільш тривалий період роботи); 3 - період швидкого (катастрофічного) зношування, що супроводжується викришуванням і навіть поломками інструменту. Цей вид зносу неприпустимий для нормальної роботи інструмента [17].

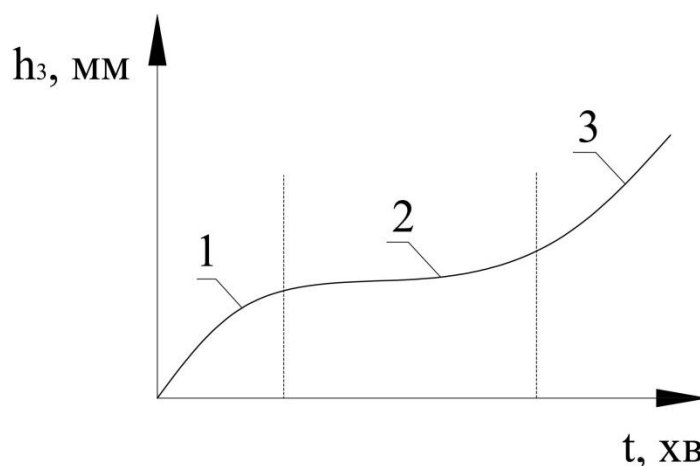


Рис.2.3. Графік зміни зносу інструменту за час його роботи

Ознака, за якою інструмент вважається затупленим (гранична величина його зносу), називається критерієм затуплення або критерієм зносу. При точінні

сталі сильно затупленим інструментом внаслідок значного зростання сил різання на обробленій поверхні з'являється блискуча смужка, а при обробці чавуну - смужка жовтого кольору або пучок іскор. Зазначені критерії затуплення ріжучих інструментів відповідають початку періоду катастрофічного зносу і не можуть бути рекомендовані для виробництва. При надмірному збільшенні зносу інструментів можна також судити по швидкому зростанню сил різання. Такий критерій затуплення називається силовим [19].

Якщо до операції, що виконується, не пред'являються високі вимоги точності і шорсткості обробленої поверхні, доцільно доводити інструмент до такого ступеня зносу, при якому загальний термін його служби буде найбільшим. Такий знос називається оптимальним або найвигіднішим [17].

Затуплення, або ступінь зносу, інструменту може обмежуватися вимогами щодо забезпечення необхідних класів шорсткості і точності обробленої поверхні. У цьому випадку ступінь затуплення різального інструменту характеризується технологічним критерієм. Так, при зносі різця по задній поверхні на деяку величину h_z (Рис.2.4, а), погіршується шорсткість обробленої поверхні і, крім того, спостерігається збільшення діаметра обробленої деталі на подвоєну величину радіального зносу h_r (Рис.2.4, б) [19].

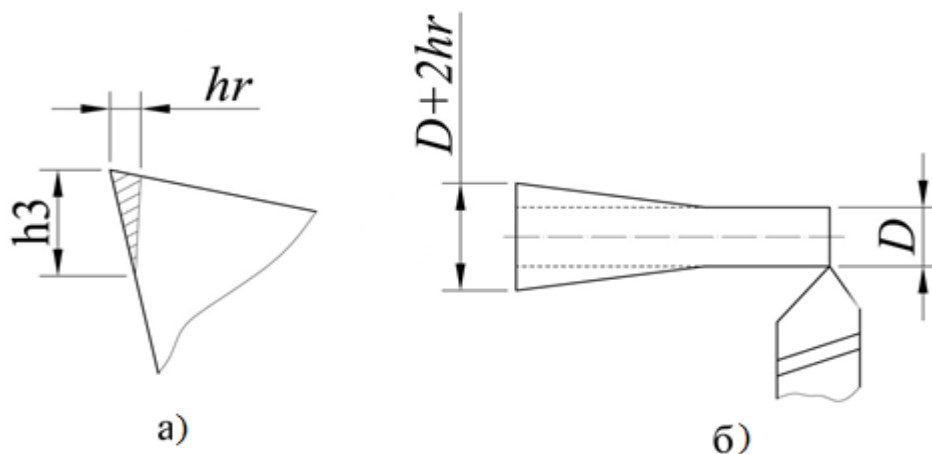


Рис.2.4. Зміна розмірів обробленої деталі при наявності радіального зносу різця

Процес зношування різальних інструментів має такі особливості: 1) висока твердість інструментального матеріалу в порівнянні з оброблюваним; 2)

великі питомі тиски на інструмент; 3) висока температура контакту поверхонь тертя інструменту і деталі, 4) постійне оновлення поверхонь тертя і видалення продуктів зносу [19].

Робочі поверхні ріжучого інструменту зношуються як від механічного впливу на нього оброблюваного матеріалу, так і в результаті молекулярно-термічних процесів, що відбуваються в зоні різання на поверхнях контакту інструмента з оброблюваним матеріалом. Інструмент може піддаватися різним за своєю природою, видам зносу: абразивному, адгезійному, дифузійному та ін. [17,20,21,22]. У процесі різання всі ці види зносу можуть мати місце, але в залежності від конкретних умов один з них є домінуючим, що визначає інтенсивність зношування та стійкість різального інструмента.

Абразивне зношування відбувається через дряпання поверхонь інструменту твердими включеннями оброблюваного матеріалу або стружкою. Тверді включення при цьому як мікрорізиці дряпають поверхню інструмента.

Частинки інструментального матеріалу, що вириваються стружкою або частки наросту, що періодично руйнується, який володіє твердістю, близькою до твердості інструментального матеріалу, пересуваючись по контактних поверхнях, забирають певний обсяг інструментального матеріалу і залишають сліди у вигляді подряпин [17].

Адгезійне зношування здійснюється шляхом відриву силами адгезії найдрібніших частинок інструментального матеріалу. Оскільки при різанні на поверхнях контакту діють колосальні тиски і в контакт приходять новоутворені ювенільні поверхні, вільні від будь-яких плівок, створюються сприятливі умови для інтенсивної адгезії контактуючих матеріалів.

Руйнування може проходити як в обсязі інструментального матеріалу, так і за обсягом менш міцного оброблюваного матеріалу. В цьому випадку налипання, що утворилося на поверхні інструменту, викликає ускладнення переміщення стружки, додаткове її деформування і локальне підвищення температури, яке призводить до ослаблення сил металевої зв'язки інструментального матеріалу [17].

Дифузійне зношування. При різанні на високих швидкостях, коли в зоні різання розвивається температура близько 1000°C , оброблюваний матеріал сильно розм'якшується, а співвідношення твердостей $H_{I.M.}$ і $H_{O.M.}$ стає дуже великим, знос різального інструмента, однак, не тільки не зменшується, але ще більше зростає. Справа тут в тому, що при високій температурі стає відчутним процес взаємного дифузійного розчинення інструментального і оброблюваного матеріалів [26]. Оскільки при різанні час контакту оброблюваного матеріалу з інструментальним обчислюється сотими і тисячними долями секунди, градієнт концентрації постійно великий і дифузійний знос протікає досить інтенсивно [20].

2.2.2. Аналіз методів та засобів контролю зношування різального інструмента

Методи контролю зносу інструменту можна умовно розділити на прямі (безпосередні) і непрямі, здійснювані на верстаті і поза верстатом, в процесі різання або перериваючи процес різання [20].

Методи безпосереднього контролю

Методи безпосереднього контролю зносу інструменту поза верстатом описані в роботах [23,24]. Ці методи можуть бути застосовані тільки в лабораторних умовах тому, що для їх реалізації необхідно зупинити процес різання, зняти інструмент з верстата, при цьому витратити значний час.

До методів безпосереднього контролю зносу інструменту на верстаті відносяться методи, засновані на застосуванні волоконної оптики, класного контактного датчика, електричного реєстру [23], а також шляхом зняття відбитку з поверхні інструменту [24]. Недоліками розглянутих вище методів є необхідність переривання процесу різання, складність і трудомісткість реалізації.

Метод контролю зносу інструменту в процесі різання із застосуванням лазерної техніки описаний в роботі [25]. На салазки супорта верстата

встановлюють лазер, випромінюючий паралельний пучок променів, який прямує на ріжучу кромку і при цьому розділяється навпіл. Із збільшенням зносу інструменту змінюється відносне положення кромки на заготівці, що розділяє пучок. Проте значна складність методу і мала перешкодозахищеність не дозволяє широко його використовувати у виробничих умовах.

У роботах [26,27] представлені результати застосування радіоактивних ізотопів як метод контролю зносу інструменту. Застосування цього методу не дозволяє судити з якої ділянки поверхні інструменту відбувається знос, яка величина зносу в числовому вигляді. Крім того реалізація методу ускладнена необхідністю радіаційного захисту.

Непрямі методи контролю

Залежно від вимірюваних непрямих параметрів методи контролю зносу інструменту можна розділити на чотири основні групи [20]:

- вимірювання параметрів заготовки;
- вимірювання теплових і електричних характеристик зони різання;
- віброакустичні вимірювання;
- вимірювання силових параметрів.

В свою чергу остання група по силових параметрах ділиться на п'ять підгруп, які засновані на вимірюванні наступних параметрів процесу різання: сили різання, потужність різання, крутного моменту, струм якоря двигуна головного приводу.

На відміну від прямих методів контролю зносу різального інструменту непрямі методи значною мірою використовуються на практиці, безпосередньо в процесі механічної обробки.

Найбільше поширення в промисловості набули наступні методи діагностики різального інструменту [20]:

- метод оснований на вимірюванні температури різання;
- метод оснований на віброакустичних вимірюваннях;
- метод оснований на вимірюванні потужності різання;
- метод оснований на вимірюванні сили різання.

Аналіз методів контролю на основі температури різання

Температура є домінуючим чинником, що визначає стан ріжучої частини інструмента. Ріст зносу h_3 викликає ріст потужності джерела теплоти, а потім і ріст температури. При більших швидкостях різання температура визначає структуру й властивості інструментального матеріалу, від яких залежить інтенсивність зносу й наробіток до відмови. Отже, температура може служити інформативною ознакою стану інструмента, але практично скористатися цією властивістю температури не представляється можливим у зв'язку з тим, що методи її вимірювання в інструменті мало придатні для виробничих умов при експлуатації технологічної системи [20].

Широке застосування для теплового контролю технологічного устаткування знаходять термістори або терморезистори – напівпровідникові резистори, електричний опір яких істотно змінюється з ростом температури. Для тих же цілей використовуються безконтактні методи інфрачервоної термографії за допомогою тепловізорів і пірометрів [20].

Прикладом реалізації даного методу є робота [28] в якій запропонована математична модель визначення величини зносу різального інструменту та на її основі встановлені критерійні залежності зносу інструмента від параметрів теплових явищ.

В роботі [26] також розглядається спосіб визначення зносу різального інструменту на основі аналізу температурних явищ, що виникають безпосередньо в зоні різання. Наведено блок-схему реалізації даного способу та проаналізовано вплив зовнішніх факторів на процес вимірювання температури різання.

Ознайомившись з даним методом та прикладами його застосування можна зробити висновок, що за допомогою даного способу можна з достатньою впевненістю судити про величину зносу різального інструменту, так як

температура є найбільш інформаційним параметром процесу різання, але використання даного способу в умовах автоматизованого виробництва вимагає внесення змін в конструкцію верстата, що приводить до втрати жорсткості верстату та збільшення похибки обробки. Іншим недоліком використання даного методу є те, що при використанні МОР ускладнюється вимірювання температури, безпосередньо в зоні різання, а також збільшується імовірність виникнення похибок при аналізі величини зносу інструмента.

Аналіз методу контролю на основі віброакустичної емісії

При різанні виникають коливання різної частоти, амплітуди й інтенсивності. Вони впливають на процес стружкоутворення, якість обробленої поверхні деталі й працездатність різального інструменту [20].

Коливання також використовуються для контролю стану процесу різання й інструмента, який заснований на вимірюванні параметрів коливань елементів пружної системи верстата в широкому частотному діапазоні. Коливання умовно розділяють на три діапазони частот: низькочастотний (частота до 1 кГц), середньочастотний (від 1 кГц до 50...80 кГц), високочастотний (понад 80...100 кГц) [38]. Середньочастотні коливання зазвичай називають віброакустичними, а високочастотні – акустичною емісією (АЕ) [20].

Аналіз методу контролю на основі потужності різання

В результаті зміни крутного моменту на валу двигуна внаслідок зміни стану різального інструменту змінюється його споживана потужність. Тому реєстрація коливання з мережі споживаної потужності приводними електродвигунами може служити параметром, за яким можна оцінити знос різального інструмента [20].

За допомогою електронних пристроїв контроль цілісності інструменту може здійснюватися шляхом вимірювання потужності, що розвивається електродвигуном. Обмеженням для використання таких пристроїв є випадки обробки інструментами малого діаметра, при яких потужність, що розвивається приводним електродвигуном, практично не відрізняється від потужності холостого ходу [20].

Приклад діагностичної системи основаної на вимірюванні потужності різання наведено в [29], розглядається розробка універсальної підсистеми діагностики, здатної визначати знос інструменту та прогнозувати його залишкову стійкість. Дана підсистема є універсальною, що дозволяє її вбудовувати в різні системи керування процесом механічної обробки без значних доопрацювань, дуже швидко та відносно просто синхронізується з вбудованими системами контролю.

Найпростіші приклади пристроїв для вимірювання потужності різання наведені в роботах [25,30], використання представлених пристроїв не передбачає внесення значних змін в конструкції верстатів та не потребує дорогого та складного обладнання.

Такий метод вимірювання є одним з найбільш простих для контролю стану різального інструменту в процесі різання. До переваг даного способу контролю слід віднести його простоту, невисоку вартість, доступність інформативного параметра, відсутність істотної модернізації устаткування [20].

Розглянутий метод може без перешкод застосовуватись в умовах автоматизованого виробництва, але в порівнянні з вище розглянутими методами має нижчу достовірність даних про стан різального інструмента на основі яких важко точно оцінити величину зносу.

Аналіз методу контролю на основі сил різання

Одним з найбільш відомих непрямих способів контролю стану різального інструменту є спосіб, заснований на вимірюванні сил різання й крутного моменту [20].

Знаючи сили, що діють в процесі різання, можна розрахувати і вибрати ріжучий інструмент і пристосування, визначити потужність, затрачену на різання, а також здійснювати раціональну експлуатацію верстата, інструменту та пристроїв. Виникнення стружки в процесі різання відбувається під дією сили різання, що долає опір металу. Силу P , H різання при обробці точінням можна розкласти на три складові: тангенціальну P_z , що визначає потужність,

споживану приводом головного руху верстата, і спрямована вертикально вниз; радіальну P_y , спрямовану вздовж поперечної подачі (ця сила віджимає різець і враховується при розрахунку міцності інструменту та механізму поперечної подачі верстата); осьову P_x , спрямовану вздовж поздовжньої подачі (ця сила прагне віджати різець в бік супорта і враховується при визначенні допустимого навантаження на різець і механізми верстата при поздовжній подачі) [20].

Три зазначені складові сили різання взаємно перпендикулярні, тому величина і напрям рівнодіючої сили визначаються як діагональ паралелепіпеда [20]:

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2} . \quad (2.6)$$

Співвідношення величин складових сил P_z , P_y , P_x не залишається постійним і залежить від геометричних параметрів робочої частини різця, елементів режиму різання, зносу різця, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу і умов різання.

Сила різання є найбільш інформативним параметром, що характеризує безпосередньо взаємодію різального інструменту і деталі. Справа в тому, що вже давно було відмічено зростання складових сил різання з ростом фаски зносу інструменту по задній грані. Якщо вимірювати ступінь затуплення різця шириною фаски зносу по задній грані, то всі складові сили різання ростуть.

Оскільки, про величину сил різання судять на підставі вимірювання деформацій елементів технологічної системи, навантажених цими силами, то проводилися спроби вимірювати деформації елементів, досить віддалених від зони різання. Це робилося для того, щоб не знижувати універсальність верстатів і спростити конструкцію динамометричної системи. Але в цьому випадку не вдається уникнути конструктивних складнощів [20].

В роботі [31] розглядається стан сучасних методів вимірювання сил різання при токарній обробці з урахуванням динаміки різання. Також в даній роботі запропоновано спосіб та конструкція пристосування для вимірювання

сил різання по трьом координатам на основі оптоволоконного Маха-Цендера. Запропонований пристрій дозволяє надійно контролювати процес різання на всіх стадіях обробки деталі для забезпечення її якості та оптимізації виробничих витрат.

Ознайомившись з методом контролю стану різального інструменту на основі вимірювання сили різання, можна зробити висновок, що даний метод дозволяє отримати досить достовірну інформацію про стан різального інструменту, але його реалізація потребує внесення значних змін в конструкцію верстата та використання порівняно з іншими методами складного та відповідно дорогого обладнання.

2.3. Основні причини виникнення віброакустичної емісії

При різанні виникають коливання різної частоти, амплітуди й інтенсивності. Вони впливають на процес стружкоутворення, якість обробленої деталі й працездатність різального інструменту [32].

Коливання також використовуються для діагностування стану процесу різання й інструмента. Діагностика заснована на вимірюванні параметрів коливань елементів пружної системи верстата в широкому частотному діапазоні. Коливання умовно розділяють на три діапазони частот: низькочастотний, частота до 1 кГц; середньочастотні - від 1 кГц до 50...80 кГц; високочастотний - понад 80...100 кГц. Середньочастотні коливання зазвичай називають віброакустичними, а високочастотні - акустичною емісією (АЕ) [32].

Джерелами порушення низькочастотних коливань пружної технологічної системи є різні періодичні процеси [33]:

- забиття обертових тіл (шпинделя, зубчастих коліс і ін.);
- переривчасте різання, наприклад, при фрезеруванні;
- періодичність утворення елементів стружки й наросту.

Джерелом порушення віброакустичних коливань у середньочастотному діапазоні є періодичність утворення елементів стружки, складна фрикційна взаємодія інструмента з оброблюваним матеріалом і ін.

Віброакустичні коливання є наслідком взаємодії фізико-механічних властивостей оброблюваного й інструментального матеріалів, макро- і мікрогеометрії інструмента, динамічних характеристик технологічної системи, режимів різання й ін. Зміна хоча б одного з перерахованих факторів приводить до зміни частоти віброакустичних коливань [33].

Зношування різального інструменту призводить не тільки до зміни його геометрії, але й викликає зміну процесів, що впливають на віброакустичні коливання. Так, можуть змінюватися пластичні деформації при стружкоутворенні й деформації поверхневого шару деталі, змінюються умови наростуутворенні й швидкість руху стружки по передній поверхні, контактні процеси й властивості інструментального матеріалу. У зв'язку з випадковим характером впливу всіх цих процесів і факторів на віброакустичні коливання, а також у зв'язку з випадковим характером самого зношування, частота f і амплітуда A_r віброакустичних коливань кореляційно пов'язані зі станом різального інструменту [34].

Джерелом акустичної емісії із зони різання є процеси тертя й деформування. АЕ являє собою пружну енергію, що миттєво вивільняється в матеріалі при руйнуванні. Високочастотні коливання виникають також у результаті зіткнення мікронерівностей контактуючих поверхонь, розриву адгезійних зв'язків, утворення макро- і мікротріщин, руху дислокацій. Ці процеси генерують пружні хвилі, що поширюються по інструменту, оброблюваній деталі й деталям верстата. Вони відображаються постійної складової сигналу АЕ.

Зміна в характері протікання процесів викликають зміну параметрів АЕ сигналів. Причиною цього може бути порушення утворення й сходу стружки,

збільшення контактних площадок на робочих поверхнях інструмента у зв'язку з його зношуванням [35].

Високочастотні коливання АЕ дозволяють реєструвати в інструментальному матеріалі процес тріщиноутворення, що є провісником тендітного руйнування ріжучої частини інструмента. Ріст тріщин приводить до зниження рівня потенційної енергії тіла. Перерозподіляються поля напруг у металі. Це приводить до поширення високочастотних хвиль пружної деформації. Їхня реєстрація за допомогою апаратури дозволяє оцінити інтенсивність процесу тріщиноутворення, наприклад, у твердосплавній пластині. Частотний діапазон, у якому здійснюється реєстрація параметрів АЕ, перебуває в межах від десятків до сотень кГц. Область інформативних частот виділяється смуговим фільтром [35].

Перевагами методу діагностики по АЕ є незалежність параметрів діагностичних сигналів від динамічних характеристик верстата, тому що аналізований рівень частот коливань, які несуть інформацію із зони різання, значно перевищує частоти коливань працюючих агрегатів верстата.

Недоліком методу є істотне ослаблення сигналу при його проходженні стиків пружної системи верстата. Тому сигнал повинен зніматися безпосередньо з інструмента, а встановити датчик поблизу зони різання не завжди надається можливим (наприклад, на верстатах з автоматичною зміною інструмента) [36].

З розгляду коливань зрозуміло, що кожний з відзначених частотних діапазонів несе домінуючу інформацію саме про ті процеси при обробці різанням, що по своїй динаміці відповідає обраному при вимірюванні сигналів частотному діапазону. Параметри коливань у кожному діапазоні частот можуть бути застосовні як інформативні ознаки відповідних процесів [36].

Крім того, що коливання використовуються як діагностичні ознаки стану різального інструменту, вони можуть бути ознаками стану технологічного устаткування.

Датчики коливань - акселерометри використовують для реєстрації коливань, що виникають при різанні. Конструкція датчиків заснована на використанні п'єзоелектричного ефекту. Датчик перетворює в електричний сигнал прискорення коливальних рухів інструмента або тієї частини верстата, на якій він установлений. Датчик складається із трьох основних компонентів: корпусу, п'єзoeлемента й так називаної "сейсмічної маси" вантажу. П'єзoeлемент деформується відповідно до другого закону Ньютона силою, рівної добутку "сейсмічної маси" та на її прискорення $a: F = -m \cdot a$. Знак мінус показує, що вектор сили спрямований протилежно прискоренню [37].

Величині електричного заряду на гранях п'єзокристалу й величини електричної напруги між протилежними гранями буде змінюватися пропорційно прискоренню коливальних рухів, тобто механічні коливання будуть відображатися коливаннями електричного струму. Реєструється електричний сигнал за допомогою вимірювального пристрою.

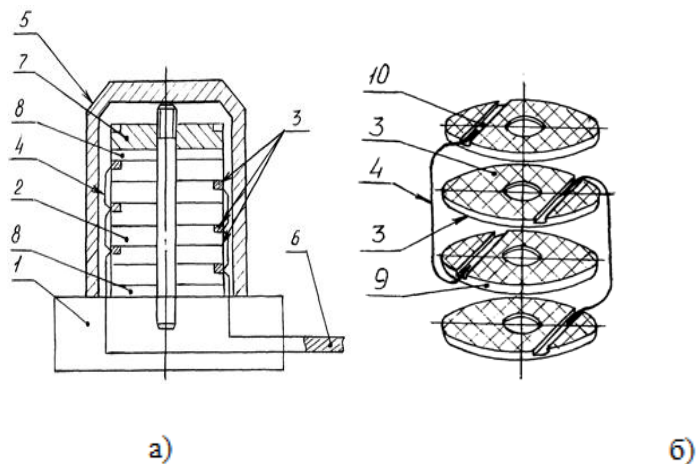


Рис.2.5. Типова конструкція п'єзоакселерометра для вимірювання акустичної емісії: а) загальний вигляд датчика, б) чутливий елемент з приведенням просторової орієнтації п'єзoeлементів.

П'єзoeлектричний акселерометр (рис.2.5,а) складається з основи 1, чутливого елемента 2 з електродами 3, замкнутими уздовж бічної поверхні різнополярними шинами 4, що з'єднують електроди однакової полярності, кришки 5 для захисту від зовнішніх впливів і кабелю 6. Чутливий елемент 2

прикріплений до основи 1 гайкою 7 і електрично ізолюваний від корпусу за допомогою ізоляційних втулок 8.

Чутливий елемент 2 (рис.2.5,б) виготовлений у вигляді набору окремих плоских елементів 9, виконаних з п'єзокерамічного матеріалу, з електродами 3 на торцевих поверхнях. З боку однієї з електродних поверхонь в п'єзoeлементах 9 виконані хордові канавки 10.

Датчики розрізняються за сприйманим ними частотам коливань. Для одержання інформативного сигналу важливо правильно визначити місце установки датчика. Критерієм правильності вибору місця є найбільша різниця між рівнем сигналу в процесі різання й на холостому ході верстата [37].

2.4. Крутний момент та методи його вимірювання

Порівняння правильності обраних режимів різання виконують також по крутному моменту. Крутним моментом різання називається добуток сили різання на радіус точіння [15].

Величину моменту різання обчислюємо за формулою (2.7) [15]:

$$M_{кр} = \frac{P_z D}{2}, \quad (2.7)$$

де P_z - сила різання, кг; D - діаметр оброблюваної поверхні, мм.

Якщо крутний момент різання набагато більше крутного моменту, взятого з паспорту для даного ступеня чисел оборотів, то режими слід переглянути в сторону збільшення. Якщо навпаки, то верстат не справиться і тоді слід зменшити швидкість різання, тобто перейти на більш низьку ступінь чисел оборотів [15].

Вимірювач крутного моменту, що виникає при роботі осьовим інструментом, дозволяє виконувати вимірювання безконтактним способом [38].

В основі його роботи лежить ефект Віллари, що складається в зміні намагніченості металу-ферромагнетика при його деформації. Ефект обумовлений зміною під дією механічних напруг структури ферромагнетика, що визначає його намагніченість [38].

Вимірювач, що є індуктивним датчиком, складається (рис.2.6) з корпусу 1, в якому знаходиться індукційна котушка 2, магнітодріт 3, магніт із фериту барію 4, пружинне кільце 5, який закривається кришкою зі штекерами 6 та має фланець 7.

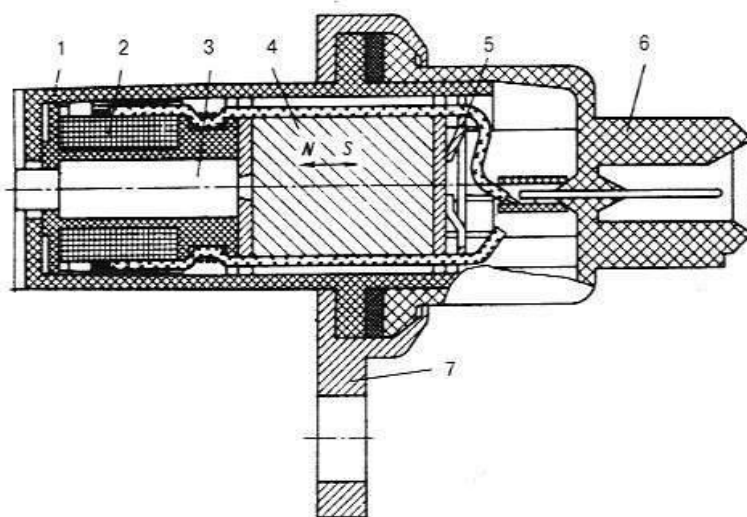


Рис.2.6. Індуктивний датчик.

Індукційна котушка 2 накопичує струм, потім передає його через магнітодріт 3 на магніт 4 з феромагнітним сердечником, намагніченість якого, а отже, і індуктивність змінюється в результаті деформації під дією моменту сил різання. Далі сигнал з датчику передається на вимірювальний блок, який сприймає змінний струм звукової частоти й підсилює вихідний сигнал, перетворюючи його в цифрову форму [38].

Прилади для вимірювання крутного моменту наведені в таблиці 2.1.

Номінальна потужність балансирних динамометрів не повинна перевищувати номінальної потужності випробуваного пристрою більш ніж в 2 рази. Похибка силовимірювань, які використовуються для виміру крутного моменту балансирними динамометрами, повинна бути не більше максимального значення шкали [38].

Таблиця 2.1. Прилади для вимірювання крутного моменту

Вимірювальний пристрій	Відносна похибка, %	Діапазон вимірюваного моменту, Н*м	Частота обертання, с ⁻¹
1. Торсіометри:			
крутильні стробоскопічні	±1	До 5	До 12000
крутильні електричні з використанням	±(0,5÷2)	1-3000	60-600

тимчасового методу вимірювання крутного моменту			
крутильні електричні з використанням фазового методу вимірювання крутного моменту	$\pm(0,5\div 1)$	5-400	3000-36000
крутильні індуктивні	$\pm(1\div 2)$	До 8000	До 60000
тензометричні з магнітопружним перетворювачем	$\pm 1,5$	250-7500	До 300
тензометричні омичні	$\pm 1,5$	100-200	До 3000
2. Балансирні динамометри			
електричні постійного струму в двигунному та генераторному режимах	$\pm(0,1\div 0,2)$	До 5000	60-3600
електричні змінного струму в двигунному та генераторному режимах	$\pm(0,2\div 0,5)$	До 100	До 6000
гідравлічні гальмівні	Від $\pm 0,1$	До 10000	180-60000
механічні гальмівні	$\pm(1\div 5)$	До 2000	До 1800
електромагнітні гальмівні	$\pm(0,5\div 2)$	До 2000	До 1800

2.5. Розробка математичної моделі

Для отримання двопараметричної адаптивної системи керування процесом обробки деталей в умовах «безлюдної технології» необхідно знайти залежність між параметрами віброакустичної емісії та крутного моменту різання від зношування по задній поверхні. Після того, як керуюча програма на основі інформації по цим двом параметрам спрогнозує появу критичного зношення різального інструменту, за допомогою керування параметрами режиму різання, програма збільшує стійкість інструменту, а отже інструмент може працювати при максимально можливій для нього стійкості. Це дуже зручно в умовах різної середньої стійкості поставленої партії різальних інструментів або ж різальних пластин.

Отже, щоб встановити взаємозв'язок між параметрами віброакустичної емісії та крутним моментом різання використовується відома формула з використанням комбінаційного параметру АЕ [39]:

$$W_M = \frac{A^2 \square N_{\Sigma}}{P_c}, \quad (2.8)$$

де $A^2 \square N_{\Sigma}$ – потужність акустичної емісії; A – амплітуда сигналу АЕ; N_{Σ} – активність сигналу АЕ; P_c – потужність різання.

Момент різання є більш інформативним параметром ніж потужність та сили різання та його легше вимірювати, отже, його можна виразити з формули потужності [16] таким чином:

$$P_c = \frac{t \cdot s \cdot v \cdot K_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta}, \text{кВт} \quad (2.9)$$

де, t - глибина різання, мм; s - подача, мм/об; v - швидкість різання, м/хв; K_c - ударна сила різання, кПа; η - ККД верстату (0,75-0,9). Головна складова сили різання $F_z = t \cdot s \cdot K_c$, Н.

Підставивши формулу моменту через сили різання отримаємо формулу залежності акустичної емісії від крутного моменту різання:

$$W_M = \frac{A^2 \cdot N_\Sigma \cdot \eta \cdot D \cdot 60000}{M_{кр} \cdot v \cdot 2000}, \quad (2.10)$$

де, D - діаметр деталі, що використовується у формулі крутного моменту.

Далі слід встановити залежність віброакустичної емісії та моменту різання та визначити можливість управління режимами різання. Для цього у формуле підставляємо наш комбінаційний параметр АЕ та отримуємо математичну модель залежності зношення різального інструменту [39]:

$$h_u = \Delta h_u + k_w \cdot j_u \cdot \frac{A^2 \cdot N_\Sigma \cdot \eta \cdot D \cdot 60000}{M_{кр} \cdot v \cdot 2000}, \quad (2.11)$$

де Δh_u – наявне зношення, мм; j_u – інтенсивність зношення ($j_u = \frac{h_u(i)}{h_u(i-1)}$);

k_w – поправочний коефіцієнт по співвідношенню зношення інструменту і комбінаційного параметру АЕ, який визначається експериментально для різних комбінацій матеріалів «інструмент – деталь» і заноситься в базу даних.

Отже, за допомогою формули (2.11) можна знаходити залежність зношення інструменту по задній поверхні на основі даних з датчиків акустичної емісії та крутного моменту та прогнозувати зношення, і в залежності від степеню зношення коректувати режими різання за допомогою зміни швидкості різання, яка фігурує в формулі математичної моделі.

Висновки до розділу

1. На основі аналізу інформації про фізику процесу різання та аналізу вже існуючих систем адаптивного керування, було обрано параметри крутного моменту та ВАЕ для дослідження зношування інструменту.

2. За розглянутими видами зношення різального інструменту та методами його вимірювання можна зробити висновок, що найінформативнішим та зручним у вимірюванні зношення по задній поверхні є параметр віброакустичної емісії. Він має досить багато переваг перед іншими методами вимірювання зношення, тому його вибрано за основу адаптивної системи. Для більш точнішого вимірювання зношення інструменту по задній поверхні було вибрано також сигнал крутного моменту різання. Від дуже простий у вимірюванні, його можна безконтактно контролювати за допомогою датчику, тож не має необхідності переналагоджувати сам верстат під датчик. Двопараметрична система діагностики хоч є і більш дорогою, ніж, наприклад, система з вимірювання параметру безпосередньо віброакустичної емісії, але точність вимірювань зростає у рази, тож є можливість збільшити стійкість інструменту.

3. Створено математичну модель, за допомогою якої можна визначати ступінь зносу, на основі параметрів АЕ та крутного моменту різання з наступним прогнозуванням зношення керуючою програмою та зміною швидкості різання згідно даної інформації. Дану математичну модель можна легко реалізувати на ЕОМ та використати в керуючій програмі.

3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК В УМОВАХ БЕЗЛЮДНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Відомо, що на процес різання при обробці деталі на верстаті суттєвий вплив здійснюють різноманітні непостійні фактори, як, наприклад, нерівномірний припуск і неоднакова твердість заготовки, зміна різальних властивостей інструмента по мірі їх затуплення і т.д [17].

Все це порушує постійність сили різання, призводить до переміщень в пружній системі ТОС в процесі обробки заготовки і, як наслідок, до похибки геометричної форми оброблюваної деталі. Для усунення цих недоліків і забезпечення потрібної точності треба зменшувати подачу, збільшувати число робочих ходів або вводити інші корективи в технологічний процес, що в значній мірі ускладнює роботу станочника.

Помилкові корективи оператора, які внесені в обробку, призводять не тільки до зниження продуктивності, але і до перевантажень приводів верстату, пошкоджень інструменту і т.п. Тому все ширше використання знаходять адаптивні системи керування процесами обробки деталей, які виключають вказані недоліки. Це досягається завдяки встановленню на верстат високочутливих датчиків і швидкодіючих виконуючих механізмів, які, в процесі різання забезпечують автоматичну зміну відносних переміщень відповідних ланок системи ТОС в залежності від відхилень, які виникли під час роботи [17].

3.1. Розробка структурної схеми системи адаптивного керування

На підставі проведених експериментальних досліджень [27], можна зробити висновок, що найбільш інформаційними параметрами, на підставі яких можна з упевненістю судити про стан різального інструменту, є акустична емісія та крутний момент різання.

Тому, система контролю зношування різального інструменту повинна бути заснована на вивченні природи виникнення при різанні сигналу акустичної емісії.

Двопараметрична система контролю зношування різального інструменту, що базується на вимірюванні сигналу акустичної емісії та крутного моменту різання має наступні переваги:

- запобігання виникненню аварійних ситуацій;
- можливість обробки всіх видів матеріалів;
- нема потреби вносити зміни в конструкцію верстата;
- висока надійність та точність устаткування.

Система контролю зношування різального інструменту має два паралельні контури контролю.

У першому контурі відбувається зчитування комбінаційного параметру віброакустичної емісії за допомогою спеціального датчику. Дана інформація проходить через блок підсилення сигналу та АЦП і потрапляє до комп'ютеру, де очікує появу сигналу з іншого контуру контролю.

Другий контур контролю – це контроль крутного моменту різання. Сигнал, так як і в першому контурі проходить через АЦП та потрапляє до комп'ютеру, де вже за наявності сигналу, отриманого з першого контуру контролю, за допомогою математичної моделі обчислюється величина зношування інструменту по задній поверхні та порівнюється з граничним значенням критеріального зношення. Далі адаптивна система прогнозує зношення інструменту та за допомогою критерію оптимізації, варіюючи параметр швидкості різання, створює умови для досягнення максимально можливої стійкості інструменту. Представлена система контролю зношування різального інструменту дозволяє дуже швидко реагувати на надзвичайні ситуації в процесі обробки (поломка інструменту, верстату та ін.), а також визначати величину зношування інструменту та на основі прогнозованого зношування вводити корекцію режимів обробки.

Система контролю зношування різального інструменту (Рис.3.1) складається з датчика вимірювання сигналу акустичної емісії 1, сигнал від якого через підсилювач 2 і фільтр низьких частот 3 надходить на вхід АЦП 5. Сигнал з датчику вимірювання крутного моменту різання 4, також надходить до аналогово-цифрового перетворювача 5. Подальша обробка та аналіз вимірних параметрів проводиться за допомогою комп'ютеру 13, до складу якого входить блок оцінки інтенсивності і розміру зношування 6, де за допомогою загальної бази даних 9 на підставі даних про максимальне і мінімальне допустиме значення моменту, максимальне та мінімальне значення комбінаційного параметру віброакустичної емісії порівнюються поточні значення та передаються до блоку 7 створення математичної моделі процесу обробки, де вираховується розмір зношення різального інструменту та відбувається прогнозування його стану, тобто залишкової стійкості. Також у цьому блоці відбувається обчислення необхідної швидкості різання для забезпечення максимальної стійкості інструменту. Далі сигнал потрапляє до блоку формування керуючих сигналів 8, після чого він впроваджується у керуючу програму верстату з ЧПК 10, звідки скоректовані режими потрапляють до блоку формування керуючих сигналів верстату з ЧПК 11, та потім поступають до блоку керування виконавчими механізмами верстату 12.

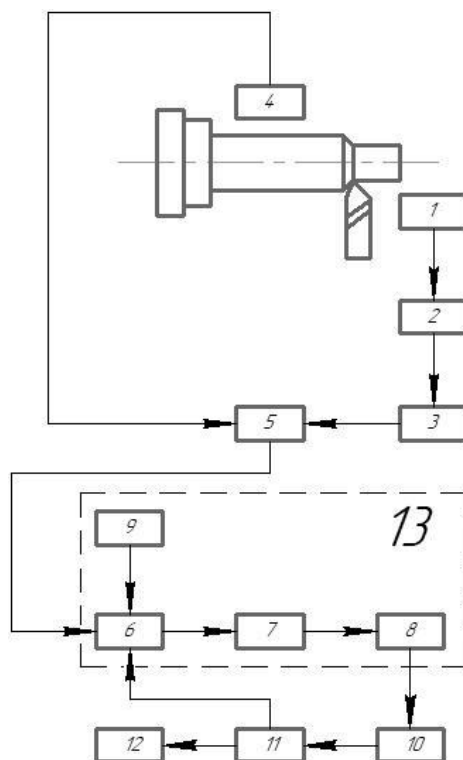


Рис.3.1. Структурна схема системи контролю процесу обробки деталей на верстатах з ЧПК в умовах безлюдного виробництва

3.2. Розробка алгоритму функціонування системи адаптивного керування зношування різального інструменту

На основі розглянутої раніше структурної схеми системи контролю зношування різального інструменту було розроблено алгоритм функціонування даної системи, який приведено на рис.3.2. По розробленому алгоритму дуже легко зрозуміти принцип функціонування адаптивної системи керування.

Блок 2 відповідає за підготовку до обробки та початок обробки заготовки згідно керуючої програми (КП). Блок 4 відповідає за діагностику по сигналу віброакустичної емісії. В блоці 5 відбувається діагностика по сигналу крутного моменту різання. Отримані дані надходять до блоку 6, де відбувається розрахунок зношення та подальший прогноз його інтенсивності. Якщо зношення в межах норми, то цикл повторюється, якщо ж ні, то перевіряється можливість корекції режимів різання для підвищення стійкості інструменту у блоці 7. Якщо корекція не можлива, значить інструмент досягнув своєї максимальної стійкості, після чого відбувається його заміна (блок 10) та запускається новий процес обробки. Якщо корекція режимів можлива, то

відбувається коригування швидкості різання у блоці 9 та продовжується обробка.

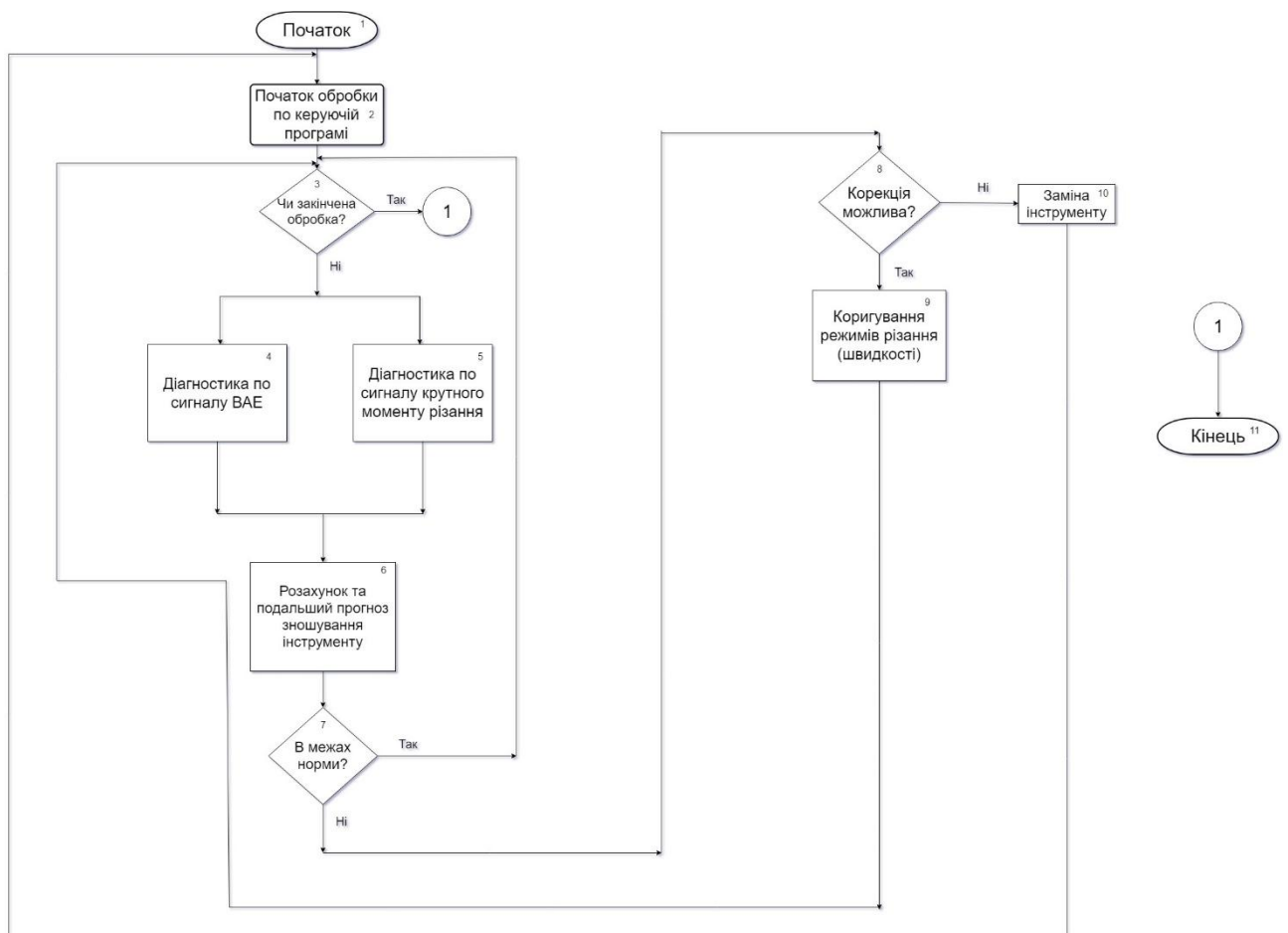


Рис.3.2. Алгоритм функціонування системи контролю зношування різального інструменту.

3.3. Розробка програмного забезпечення системи адаптивного керування процесу обробки деталей

Для проведення аналізу отриманих даних при виконанні експериментів постала необхідність у наявності програмного забезпечення для аналізу отриманого сигналу АЕ та крутного моменту різання. Тому було поставлено завдання розробити програмне забезпечення, яке б дозволяло проводити аналіз даних сигналів та на його основі будувати графік зносу різального інструменту. Головне вікно розробленої програми показано на рис.3.3.

Дана програма розроблялася на мові програмування C# з використанням інтегрованого середовища розробки Microsoft Visual Studio C# 2010 Express та з

використанням доступних до загального користування напрацювань компанії «L-CARD», що займається розробкою та виробництвом електронної апаратури.

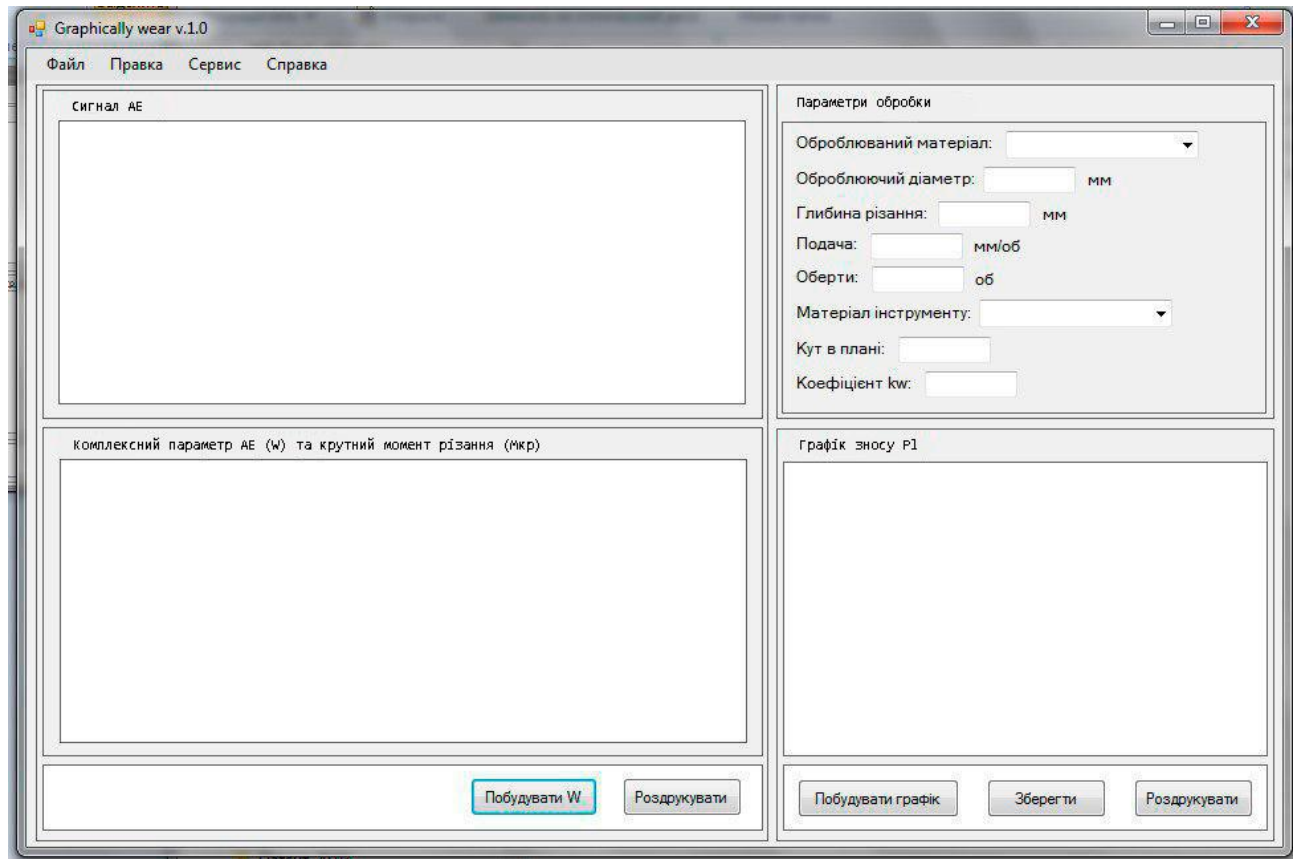


Рисунок 3.3. Головне вікно розробленої програми «Graphically wear v.1.0.»

Розроблена програма «Graphically wear v.1.0.» дозволяє завантажувати записаний сигнал АЕ, відображає його та будує комплексний параметр АЕ (клавiша «Побудувати W»), відповідно формулі (2.8) та графік крутного моменту. Після визначення та побудови графіків будується графік зношування різального інструменту (натискання клавiші «Побудувати графік»), що показує зношування різального інструменту на протязі всього часу обробки. Графік зношування різального інструменту будується відповідно до математичної моделі зношування різального інструменту (2.11).

Висновки до розділу

1. Складено структурну схему функціонування двопараметричної системи адаптивного керування процесом обробки деталей приладів на верстатах з ЧПК в умовах «безлюдної технології», яка повністю описує всі

процеси, що відбуваються в системі. Покроково описано механізм функціонування системи та подання керуючого сигналу на верстат з ЧПК.

2. На основі функціональної схеми роботи системи розроблено алгоритм функціонування системи контролю зношення різального інструменту, де описано кожен блок та зображено паралельну двоконтурну систему отримання сигналів з датчиків на комп'ютер.

3. На основі структурної схеми, алгоритму функціонування, та наявної математичної моделі складено програмне забезпечення на мові програмування C# у середовищі Microsoft Visual Studio C# 2010 Express. Розроблена програма «Graph wear» будує графіки залежності ВАЕ та крутного моменту від зношування інструменту, що дозволяє спрогнозувати інтенсивність зношення та подати коректуючий сигнал на виконавчі механізми верстату з ЧПК

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ

4.1. Методика проведення досліджень

Метою експерименту є встановлення залежності зношування різального інструменту в залежності від режимів обробки, за допомогою оцінки сигналу акустичної емісії та сигналу крутного моменту різання вимірюваних під час обробки.

Для проведення експерименту було обрано токарний верстат з ЧПК моделі ТПК-125, на якому оброблялась заготовка, матеріал – Сталь 45, спеціальним токарним різцем із механічно закріпленими ріжучими пластинками Т5К10.

При проведенні експериментів режими різання змінювалися в наступних межах: оберти S від 300 до 1600 об/хв, подача від 0,06 до 0,3 мм/об, глибина різання t від 0,2 до 1 мм, геометрія різальної частини інструменту: $\gamma = 3^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$; $\lambda = 0^\circ$.

Зношування по задній грані вимірювалося за допомогою інструментального мікроскопа УМІ N5807 з ціною поділки 0,01 мм.

Після проведення досліджень, отримані дані аналізуються та визначається поправочний коефіцієнт (k_w), що показує відношення зношування інструмента та комбінаційного параметра сигналу АЕ. Після визначення поправочного коефіцієнта (k_w) будуються та аналізуються графіки зношування різального інструменту за допомогою розробленої програми Graphically wear v.1.0.

4.1.1. Техніка вимірювання віброакустичної емісії

Контроль сигналу акустичної емісії здійснюється за допомогою спеціалізованих приладів - віброметрів, сигнал на які подається від віброперетворювача - акселерометра, закріпленого на об'єкті діагностики.

Використовувані як віброперетворювачі п'єзоелектричні акселерометри перетворюють прискорення коливання в електричний сигнал; відношення між цими двома значеннями являє собою чутливість акселерометра, що виражається через напругу $\text{мВ/м}\cdot\text{с}^{-2}$ або через заряд $\text{пКл/м}\cdot\text{с}^{-2}$. Зазвичай акселерометри мають нормалізовану чутливість, відрегульовану у процесі виробництва з допуском $\pm 2\%$ на певне значення, кратне 10. Застосування нормалізованих акселерометрів полегшує калібрування вимірювальних трактів і дозволяє ефективно працювати в багатоканальних системах. Частотна характеристика акселерометра лінійна аж до його резонансної частоти, що залежить від маси акселерометра і способу його закріплення. Наприклад, для акселерометра масою 15 г верхня гранична частота його робочого діапазону становить: при кріпленні на шпильці - 20 кГц, на магніті - 2 кГц, на щупі - 1 кГц. Для того, щоб усунути вплив акселерометра на коливний об'єкт, маса першого повинна бути в 10 разів менше, ніж в об'єкта. Для усунення впливу довжини проведення, прилад з'єднується з перетворювачем, апаратура оснащується перепідсилювачем заряду, який узгоджує опір вхід/вихід.

Зазвичай використовуються перетворювачі, що вимірюють коливання об'єкта в напрямку, перпендикулярному коливальній площині. Існують трикомпонентні перетворювачі, що дозволяють вимірювати вібрацію в трьох координатах.

Прикладами сучасних приладів для вимірювання віброакустичного сигналу є розробки фірми ЗАТ «Руднев-Шиляєв», такі як двоканальні аналізатори сигналів СА-02м (рис.4.1) та СА-02Л. Вони є багатофункціональними приладами на базі персонального комп'ютера. Аналізатори орієнтовані на вирішення різних завдань в акустичному і вібраційному діапазонах частот. СА-02м та СА-02Л застосовуються для:

вимірювання і аналізу параметрів шуму і вібрації в реальному масштабі часу; дослідження віброакустичних властивостей конструкцій, машин і механізмів; діагностики механічного обладнання для оцінки його технічного стану, пошуку несправностей та попередження відмов; екологічного контролю. Особливостями аналізаторів є те, що вони забезпечують вимірювання та цифрову обробку вимірюваних сигналів одночасно по двох каналах. Ці виміри можуть бути проведені у відповідності з обраними методом: «Спектральне накопичення», «Синхронне накопичення», «Розподілу», «Власні спектри».



Рис.4.1. Двоканальний аналізатор СА-02м

Технічні характеристики двоканального аналізатора СА-02м приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Технічні характеристики двоканального аналізатора СА-02м

<u>Загальні дані</u>	
Кількість вимірювальних каналів	2 із 16 каналів
Тип АЦП	Послідовного наближення
Роздільна здатність АЦП	14 біт
Діапазони вхідних напруг, В:	10; 5; 2,5; 1; 0,5; 0,25; 0,1
Полоси пропускання, Гц	80000, 40000, 20000, 12800, 10000, 6400, 5000, 3200, 2500, 1600, 800, 400, 200, 100
Сумарний динамічний діапазон	118 дБ

Пульсація в полосі пропускання	0,3 дБ
Перехресний шум	-80 дБ
Міжканальні спотворення (з цифровою корекцією):	Модуль: 0,1 дБ Фаза: < 0,3
Цифровий тригер	ТТЛ сумісний
ІСР живлення на кожен канал	24В, 4 мА
<u>Параметри аналізу</u>	
Кількість полос аналізу (вибирається користувачем)	до 6400
Режими згладжування рез. вим.	Лін., експ.
Перекриття даних	0 – 0,875%
Кількість режимів запуску	9

4.1.2. Техніка вимірювання крутного моменту

Вимірювач крутного моменту, що виникає при роботі осьовим інструментом, дозволяє виконувати вимірювання безконтактним способом.

В основі його роботи лежить ефект Віллари, що складається в зміні намагніченості металу-феромагнетика при його деформації. Ефект обумовлений зміною під дією механічних напруг структури феромагнетика, що визначає його намагніченість.

Вимірювач, що є індуктивним датчиком, складається (рис.4.2) з корпусу 1, в якому знаходиться індукційна котушка 2, магнітодріт 3, магніт із фериту барію 4, пружинне кільце 5, який закривається кришкою зі штекерами 6 та має фланець 7.

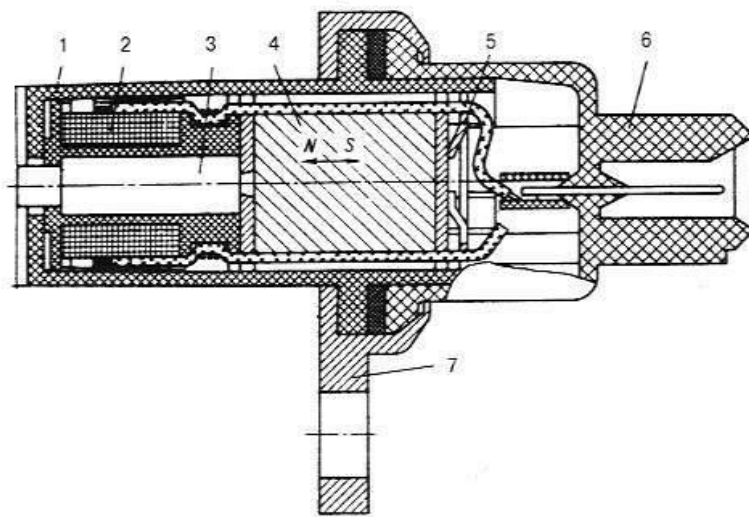


Рис.4.2. Індуктивний датчик.

Індукційна котушка 2 накопичує струм, потім передає його через магнітодріт 3 на магніт 4 з феромагнітним сердечником, намагніченість якого, а отже, і індуктивність змінюється в результаті деформації під дією моменту сил різання. Далі сигнал з датчику передається на вимірювальний блок, який сприймає змінний струм звукової частоти й підсилює вихідний сигнал, перетворюючи його в цифрову форму.

4.2. Експериментальні дослідження залежності віброакустичної емісії та крутного моменту зі зносом інструменту

Експериментальна установка побудована на основі токарного верстату ТПК-125 (рис.4.3), що керується системою ЧПК типу PCNC, яка складається з персонального комп'ютера та модулю керування верстатом – 3 Axis TB6560 Stepper Motor Driver.



Рис.4.3. Зовнішній вигляд токарного верстата ТПК-125.

Для дослідження вібрацій зони різання була створена вимірювальна система (рис. 4.4), що складається з датчику 1, який вловлює коливання зони різання, підсилювача корисного сигналу 2, АЦП 3 для перетворення сигналу з аналогової в цифрову форму та персонального комп'ютера 4 зі спеціальним програмним забезпеченням, було використано демоверсію PowerGraph 3.3 Демо, для обробки та аналізу результатів вимірювання. Для роботи підсилювача 2 використовується блок живлення 5.

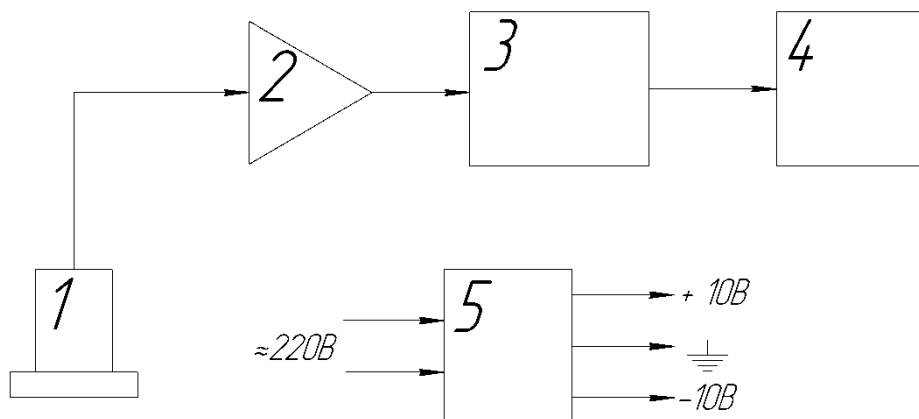


Рис.4.4. Блок-схема системи для вимірювання коливань зони різання.

Вібрації зони різання вимірювалися за допомогою п'єзоелектричних акселерометрів ИС-318 (рис.4.5), основні характеристики якого показані в табл. 4.3.



Рис.4.5. Зовнішній вигляд датчику ИС-318.

Таблица 4.3. Технічні характеристики акселерометру ИС-318

<u>Параметр</u>	<u>Значення</u>
Коефіцієнт віброперетворювача, мВ*с ² /м	0,05 - 0,15
Частотний діапазон, Гц	50 - 2000
Частота власних коливань, кГц	80
Ємність, мФ	1500
Коефіцієнт поперечного підсилення	5
Найбільше прискорення, м/с ²	1000
Діапазон температур, °С	від -50 до +50
Маса, г	22

Датчик встановлювався на супорті (рис.4.6) та різцетримачі (рис.4.7) верстату.



Рис.4.5. Місце встановлення датчика ІС-318 на супорті.



Рис.4.6. Місце встановлення датчика ІС-318 на різцетримачі.

Отриманий сигнал попередньо підсилювався за допомогою двокаскадного підсилювача заряду, який побудований на основі операційного підсилювача ОР282. Підсилювач побудований за стандартною схемою, яку рекомендує виробник. Перший каскад – узгодження з датчиком, другий – буфер з низьким вихідним опором. Принципова схема підсилювача показана на рис.4.8, а основні технічні характеристики дані в табл. 4.4.

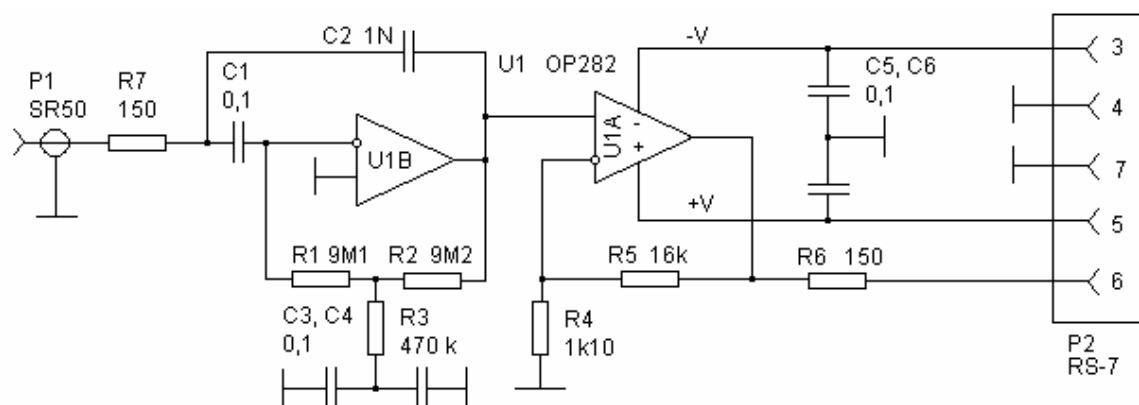


Рис.4.8. Принципова електрична схема двокаскадного підсилювача заряду.

Таблиця 4.4. Технічні характеристики підсилювача

Параметр	Значення
Кількість каналів	1
Напруга живлення, В	$\pm 9 \div 5$
Сумарна ємність п'єзодатчика і вхідного коаксіального кабелю, не більше пФ	2000
Тип входу	Заряд
Тип виходу	Напруга
Робоча смуга частот	1 Гц \div 20 кГц
Максимальна вхідна амплітуда заряду, пКл	$\pm 500 \div 850$
Вихідний струм, не більше, мА	2
Вихідний опір, Ом	150
Коефіцієнт передачі в робочій смузі частот, мВ/пКл	16

Для живлення підсилювача використовувався блок живлення. Блок живлення побудований на стандартній схемі двохнапівперіодного випрямлення з середнім відводом. Для стабілізації випрямленої напруги використані стабілізатори LM317T та LM337T, включені за стандартною схемою рекомендованою виробником.

Для перетворення сигналу в цифру форму використовується аналого-цифровий перетворювач E14-140 L-Card призначений для вимірювання

постійного та змінного струму, а також для вводу, виводу та обробки аналогової та цифрової інформації у вимірювальних пристроях і системах на базі персональних комп'ютерів.

Спочатку, перед проведенням основного експерименту, було проаналізовано найкраще місце розташування датчика для реєстрації акустичних коливань. Сигнал зареєстрований датчиком, що знаходився на різцетримачі приведено на рис.4.9, а датчика, що знаходився на супорті на рис.4.10.

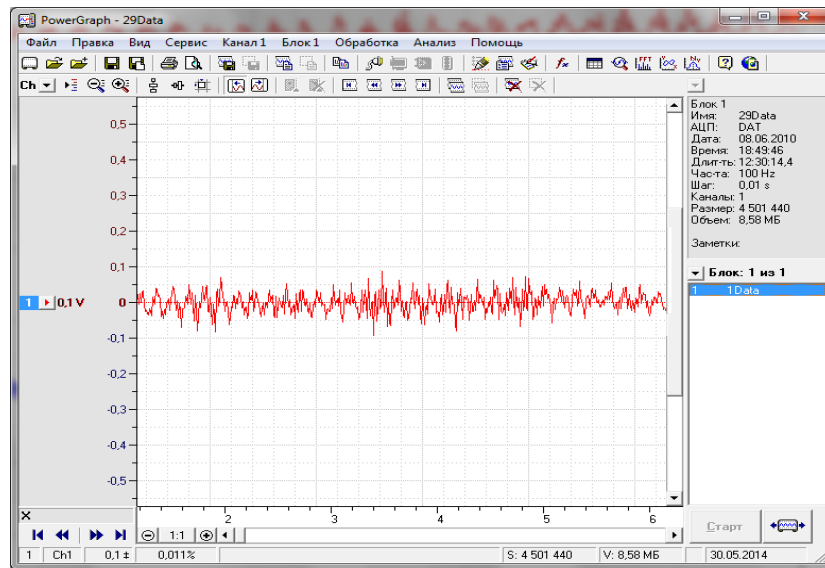


Рис.4.9. Сигнал зареєстрований датчиком, що знаходився на різцетримачі.

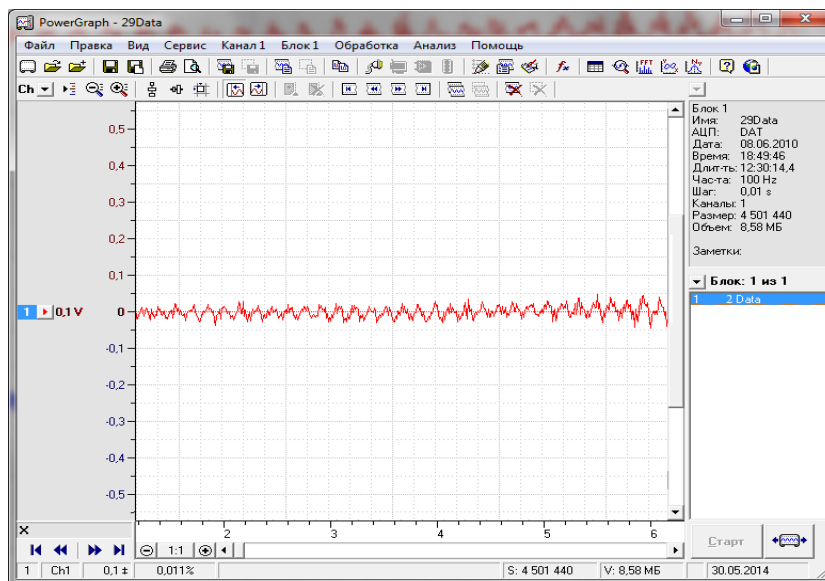


Рис.4.10. Сигнал зареєстрований датчиком, що знаходився на супорті.

Як видно з рис.4.9 та 4.10 більш вдалим є розміщення датчика на різцетримачі, тому, сигнал зареєстрований даним датчиком має більшу амплітуду, що дає змогу більш краще виділити корисну складову сигналу та провести відповідну її обробку.

Тому було прийняте рішення проводити наступні експерименти з використанням та реєстрацією сигналу тільки датчиком, що закріплений на різцетримачі.

Проведення основного експерименту:

Експеримент № 1: глибина різання 0,5 мм, подача 0,08 мм/об, оберти 800 об/хв. На рис.4.11 приведено результати експерименту оброблені в розробленій програмі Graphically wear v.1.0.

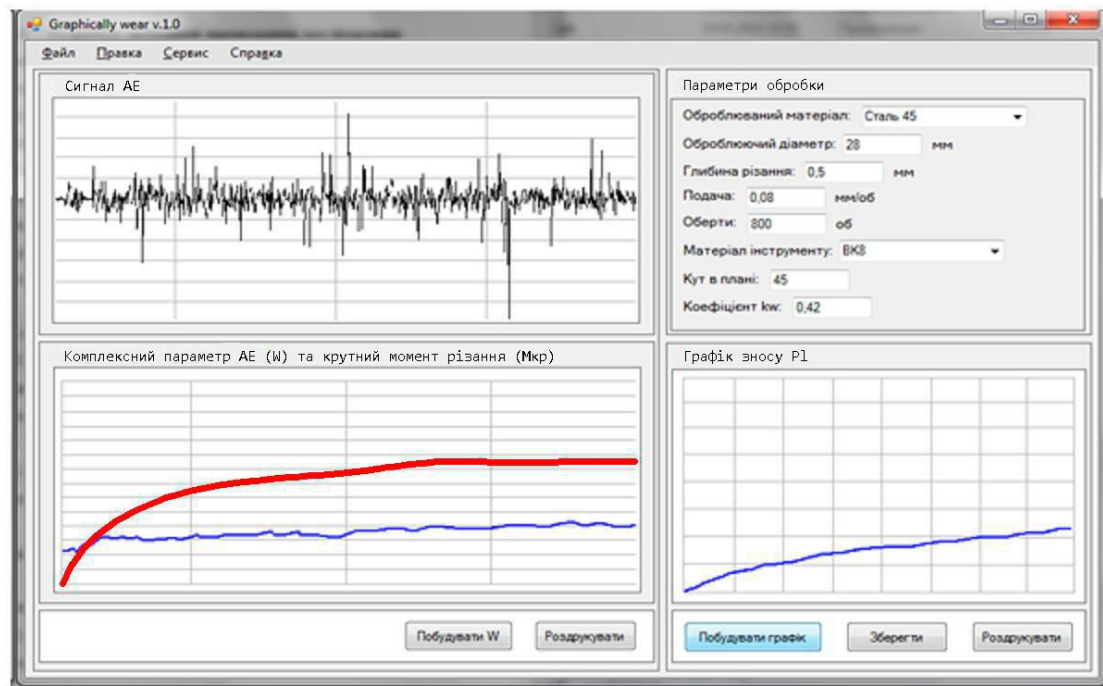


Рис.4.11. Опрацювання програмою Graphically wear v.1.0 результатів експерименту № 1.

Експеримент № 2: глибина різання 0,5 мм, подача 0,1 мм/об, оберти 800 об/хв.. На рис.4.12. приведено результати експерименту оброблені в програмі Graphically wear v.1.0.

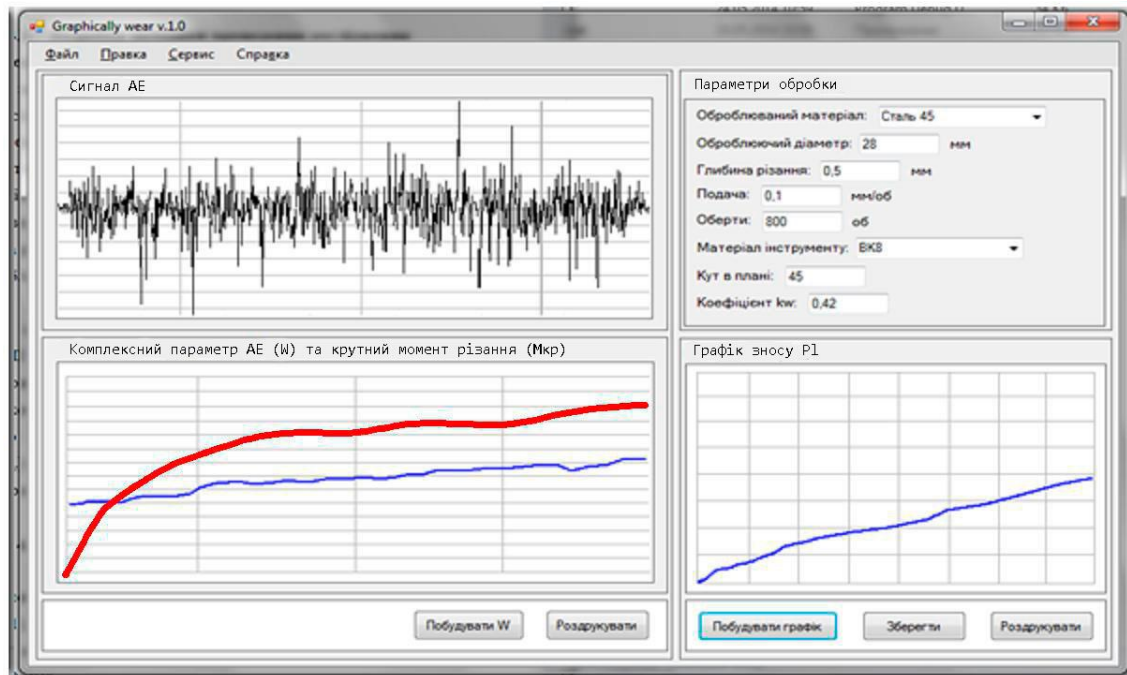


Рис.4.12. Опрацювання програмою Graphically wear v.1.0 результатів експерименту № 2.

Експеримент №3: глибина різання 0,5 мм, подача 0,12 мм/об, оберти 800 об/хв. На рис.4.13. приведено результати експерименту оброблені в програмі Graphically wear v.1.0.

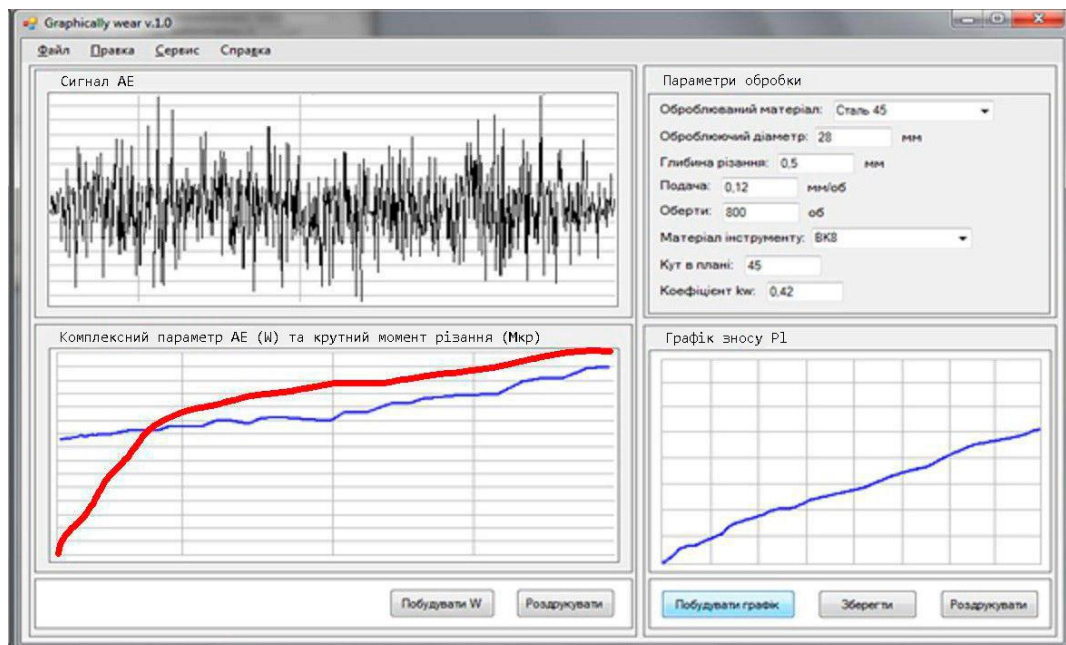


Рис.4.13. Опрацювання програмою Graphically wear v.1.0 результатів експерименту № 3.

На основі експерименту було визначено залежність зношування різального інструменту при зміні величини подачі за комбінованим параметром акустичної емісії та параметром крутного моменту– рис.4.14. З графіків видно, що зі збільшенням зношування інструменту збільшується величина комбінованого сигналу АЕ. Величина подачі впливає на інтенсивність зношування, що легко побачити на графіку.

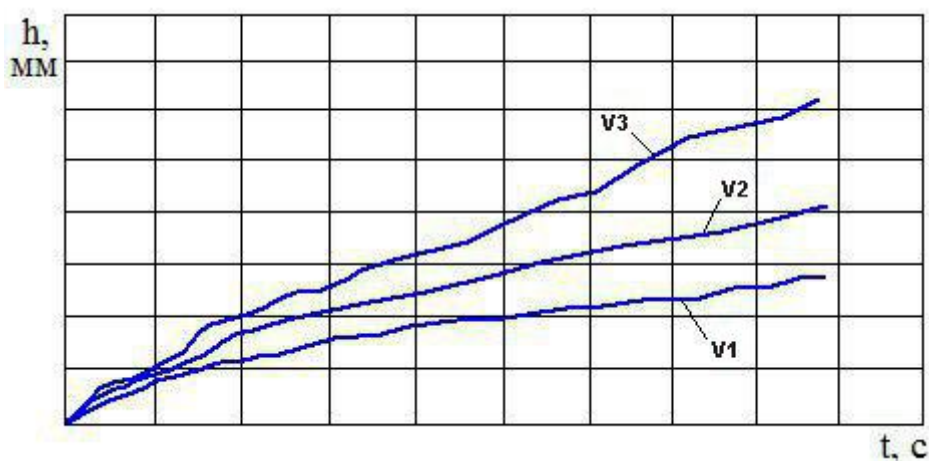


Рис.4.14. Графік зношування різального інструменту в залежності від величини подачі.

Висновки до розділу

1. У даному розділі розроблено методику проведення досліджень, яка полягає в тому, що спочатку проводяться досліди на вибраному заздалегідь обладнанні, яке описане в межах цього розділу, з різними режимами різання та подальшій перевірці даних результатів за допомогою розробленого програмного забезпечення, що дозволяє побачити графіки зношення різального інструменту в залежності від режимів.

2. Описані та застосовані техніки вимірювань сигналів віброакустичної емісії та крутного моменту різання, що дозволяє системі діагностики більш точно розрахувати зношення інструменту та покращити прогнозування його інтенсивності.

3. Проведені експериментальні дослідження залежності віброакустичної емісії та крутного моменту зі зношенням інструменту та

побудовано графік залежності зношення від величини подачі, що дозволяє вибрати оптимальний режим різання та показує, що дана адаптивна система керування обробкою деталей на верстатах з ЧПК в умовах «безлюдної технології» є дієвою та доцільною у використанні підприємствами для обчислення та прогнозування зношення різального інструменту при обробці

5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК»

5.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в попередніх розділах діагностику інструменту на зношення за допомогою параметрів віброакустичної емісії та крутного моменту та подальше коректування режимів різання у випадку його зношення, задля подовження стійкості інструменту було написано програму реалізації зміни режимів різання та створено структурну схему роботи системи та алгоритм її роботи. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту який має на меті визначити чи зможе наш продукт вийти на ринок і конкурувати з продуктами які вже зайняли на ньому своє місце [40].

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів[40].

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Система діагностики стану зношення різального інструменту на основі параметрів віброакустичної емісії та крутного моменту та подальше коректування режимів різання згідно інформації по цим двом параметрам, яка дозволяє покращити швидкість та точність проведення контролю процесу різання.	Точне приладобудування	Точне і своєчасне виявлення зношення різального інструменту.
	Токарна металообробка	Порівняно недорога вартість обладнання
	Авіабудування	Підвищення працездатності різального інструменту за рахунок коректування режимів різання
	Машинобудування	Не має необхідності перелаштовувати верстат під систему діагностики
	Ракетобудування	
		Якісне і безперебійне проведення діагностики

Отже, ідея створення системи діагностики на основі параметрів віброакустичної емісії та крутного моменту є актуальною та знайде своє коло застосування завдяки численним вигодам для користувачів.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2) [40].

Таблиця 5.1. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристи ки ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторон а)	N (нейтраль на сторона)	S (сильн а сторо на)
		Мій проект	Renisha w	Промви тех	Альконт			
1.	Торгівельна марка	немає	є	Є	є	+		
2.	Точність діагностики інструменту	Висока	Висока	Середн я	Середн я			+
3.	Діагностика в режимі “реального часу”	Присутн я	Присут ня	Присут ня	Не присутн я		+	
4.	Патенти на продукти	є	є	Є	є		+	
5.	Економічність	Середня ціна	Висока ціна	Висока ціна	Висока ціна			+

Отже, дивлячись на характеристики мого проекту та конкурентів, видно, що завдяки високій точності діагностики та порівняно невеликій вартості системи, завдяки зручності використання та режиму роботи в ‘реальному часі’ дана система діагностики має деяку перевагу над товарами-аналогами та замінниками в деяких компонентах та є нейтральними в інших.

5.2. Технічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології (методики розрахунків), за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту [40].

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 5.3 [40].

Таблиця 5.2. Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1	Встановити двоканальний аналізатор для контролю вібрації	Придбати двоканальний аналізатор	Наявні	Доступні
2	Встановити датчик контролю крутного моменту	Придбати датчик контролю крутного моменту	Наявні	Доступні
3	Розробити програму для коректування режимів різання	Написання програми на мові Java	Наявні	Доступні
4	Організувати доставку коректуючого сигналу на виконавчі елементи	Придбати керуючий елемент	Наявні	Доступні

Технологічна здійсненність проекту є можливою, усі необхідні технології вже наявні та доступні для використання, тож перевагою проекту є ще те, що не треба затрачувати додаткових зусиль на створення нових технологій та отримання матеріалів на доступність їх реалізації.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.4) [40].

Таблиця 5.3. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкуренція вітчизняних та зарубіжних фірм
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	35,2%

Оцінювання потенційного ринку стартап-проекту показало, що умови для входу до ринку є сприятливими, але на ринку наявні конкурентоздатні фірми, які вже давно на ньому перебувають та успішно реалізують свою продукцію, але за рахунок переваг над ними наш продукт буде конкурентоспроможним.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5) [40].

Таблиця 5.4. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Повна автоматизація процесу обробки деталей	Приладобудівні, машинобудівні, авіа- та ракетобудівні підприємства	Обсяги виробництва	Висока точність, невисока ціна, простота встановлення та функціонування без людського втручання

Отже, встановлено, що цільовою аудиторією є промислові будівні підприємства, заводи, яким необхідна автоматизація процесу обробки задля збільшення обсягів виробництва та зменшення використання людської праці, для цього у системах діагностики повинна бути висока точність та своєчасність виявлення неполадок, простота в експлуатації та нижча ціна в порівнянні з конкурентами.

При застосуванні даної технології існують певні загрози. Для попередження таких ситуацій необхідно якісне обладнання, а також працювати з такими програмами повинні висококваліфіковані фахівці. Також, повинно своєчасне технічне обслуговування даного продукту (табл. 5.6) [40].

Таблиця 5.5. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Конкуренція	Необхідність автоматизацій виробництва спричиняє появу багатьох фірм у цій області	Наявність переваг перед конкурентами, на які буде звертати увагу покупець
2	Відсутність попиту на продукції	Не бажання споживачів переходити на нову технологію через те, що вона є дорогою та через зменшення кількості робочих місць на підприємстві	Реклама з наведенням аргументів на користь автоматизації виробництва. Аргументація автоматизації як засобу збільшення серійності виробництва та зменшення кількості браку, що призведе до збільшення доходу підприємства
3	Інфляція	Зміна курсу гривні, за рахунок чого можуть зменшитись продажі	Реалізація продукту в більш стабільній (іноземній) валюті та моніторинг економічної ситуації в країні
4	Старіння	Високі темпи модернізації продукції	Моніторинг трендів, постійна доробка згідно з вимогами клієнтів
5	Кадри	Необхідні висококваліфіковані кадри для обслуговування обладнання	Навчання та екзаменування кадрів

В таблиці 5.7 ми визначили фактори можливостей які сприяють ринковому впровадженню нашого проекту, та вигоди які компанія може отримати відповідно від реакції на той чи інший фактор.

Таблиця 5.6. Фактори можливостей

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Попит на якісний та точний продукт	Потреба покращення якості продукції, зменшення випуску браку	По можливості постійна модернізація продукту, розробка нових ідей
2	Створення нової роздрібно мережі в Україні та в Європі	Розширити можливості збуту продукту	Зробити акцент на точності, якості та відносній недорогоговизні продукту
3	Економічні	Політика протекціонізму; підтримка інноваційного виробництва	Підвищення/пониження ціни на продукт; зменшення податкового тиску
4	Науково-технічні	Зміниться технологія виготовлення товару	Впровадити технологію і змінить вартість товару
5	Можливість стати монополістом	За рахунок переваг над конкурентами є можливість захопити ринок даної продукції	Постійний розвиток та робота над вдосконаленням системи діагностики

Отже, провівши аналіз ринкового середовища, можна зробити висновок, що серед наявних загроз найбільшою є висока конкуренція на випуск даної продукції, що зумовлена бажанням повної автоматизації виробництва, тож наша компанія буде акцентувати увагу на переваги перед конкурентами, а серед наявних можливостей є попит серед підприємств на якісний та точний продукт та можливість розширити збут товару по Україні та Європі.

Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8) [40].

Таблиця 5.7. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Олігополія	В галузі домінує декілька конкуруючих фірм	Виготовлення конкурентоспроможного товару

2. Національний	Конкуренція фірм на міжнародному рівні	Реклама, проведення роботи щодо організації збуту на європейському ринку
3. Внутрішньогалузева	Виробники виготовляють продукти, які задовольняють одну потребу	Виготовлення товару схожого по ряду характеристик, та кращого за декількома.
4. Товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду та призначення	Розробка вдосконалених товарів
5. Цінова	Використання ціни як засіб кращих умов збуту	Підвищення якості продукту за рахунок використання більш дешевих матеріалів, а отже і зменшення ціни на товар
6. Марочна	Вказує, яке підприємство відповідальне за готовий продукт	Створення власної марки

В даній таблиці ми проаналізували ринок збуту нашого продукту і визначили загальні риси конкуренції на ньому.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 5.9) [40].

Таблиця 5.8. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
<i>Складові аналізу</i>	<i>Renishaw, ООО “Практическая механика”, Промвитех, Альконт</i>	<i>Наявність товарних знаків, якісний асортимент товарів у конкурентів.</i>	<i>Значення розміру поставок, диференціація витрат</i>	<i>Розмір закупівель, торговельні знаки</i>	<i>Загроз товарів замінників не існує</i>
Висновки :	Висока конкуренція серед виробників продукції, високий прибуток через збільшення попиту на продукцію	Є можливість входу в ринок за рахунок переваг своєї продукції, потенційні конкуренти присутні, але знаходяться ще на стадії ідеї	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Пред’являють вимоги до ціни, якості та точності продукту	Обмежень для роботи на ринку немає

Отже, проведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку та виявлено, що можливість виходу на ринок є, але необхідно звернути увагу на потреби клієнтів та запропонувати їм кращі умови аніж ті, які пропонують конкуренти.

Конкуренції серед потенційних конкурентів та товарів-замінників очікувати не слід.

Таким чином в межах структурного підходу до аналізу конкуренції тип конкуренції – олігополістична конкуренція.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Поки проект не впроваджено в життя, це важко зробити точно, можна дати лише попередню оцінку конкурентоспроможності (табл. 5.10) [40].

Таблиця 5.9. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Якість	Якісна безперебійна робота системи діагностики, достовірні результати
2	Точність	Точність вистежування зношення продукції більша, ніж у конкурентів
3	Своєчасність реакції	Своєчасна реакція на виявлення зношення і коректування режимів різання згідно цієї інформації
4	Ціновий	Нижча ціна порівняно з конкурентами за рахунок більш дешевої сировини

В умовах високої конкуренції на ринку, ключовими є фактори якості, точності та ціни, які повинні бути на рівні, або ж рівнем вище, ніж у конкурентів, що зумовить успішний вихід на ринок та підвищить його конкурентоспроможність.

За визначеними факторами конкурентоспроможності проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11) [40].

Таблиця 5.10. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

«Системи діагностики»

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з КСК</i>						
			<i>-3</i>	<i>-2</i>	<i>-1</i>	<i>0</i>	<i>+1</i>	<i>+2</i>	<i>+3</i>
1	Якість	15				+			
2	Точність	18						+	
3	Своєчасність реакції	16					+		
4	Ціна	19						+	
5	Новизна	15					+		

На сьогоднішній день продукт має попит на ринку, тож конкуренція є достатньо високою, тому за рахунок покращення основних показників конкурентоспроможності товару є можливість виграти конкуренцію та стати успішним учасником ринку, що й продемонстровано в аналізі сильних сторін системи діагностики, які є або на такому ж рівні з конкурентами або ж на вищому.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.12) [40].

Таблиця 5.11. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - вища точність виявлення зношення; - висока якість діагностування; - зручність встановлення системи; - ціна нижча, ніж у конкурентів; - оперативне реагування на зношення інструменту; - новизна технології; - діагностика в режимі реального часу. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - великий асортимент товарів на ринку; - продукт який ще не зарекомендував себе на ринку; - немає торгової марки.
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - попит на якісний та точний продукт; - можливість створення роздрібною мережі в Україні та Європі; - можливість стати монополістом; - зміна технологій; - підтримка інновації. 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - конкуренція; - неготовність прийняти дану систему, через вже наявні звички; - інфляція; - старіння продукції з часом; - немає кадрів з обслуговування.

На основі проведення SWOT-аналізу виявлено, що за рахунок сильних сторін продукт буде конкурентоспроможним на ринку.

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні

проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок, аналіз потенційних конкурентів.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13) [40].

Таблиця 5.12. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Впровадження нової системи діагностики на основі інших параметрів	середня	12 міс.
2	Модернізація системи	висока	4 міс.

Отже, з альтернатив буде вибрана модернізація системи діагностики, так як це може бути зробити набагато простіше і швидше, аніж створення нової системи з нуля, так як нова система потребує значних розрахунків та значного часу на проектування.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.14) [40].

Таблиця 5.13. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Державні підприємства	Готові	Середній попит	Висока	Середня
2	Приватні підприємства	Готові	Високий попит	Висока	Складна
3	НДІ	Готові	Низький попит	Низька	Просто
Які цільові групи обрано: Державні та приватні підприємства. Хоч конкуренція в цих сегментах висока та вхід до цих сегментів складний, все ж прибуток та кількість замовлень у даних сегментах планується набагато вищою ніж в сегменті НДІ. Використовується стратегія диференційованого маркетингу.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи, для яких будемо пропонувати систему діагностики та визначили

стратегію охоплення ринку: стратегію диференційованого маркетингу, тому що працюємо із конкретним сегментом, розробляючи для нього програму ринкового впливу.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 5.15) [40].

Таблиця 5.14. Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ п/п</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
1	Стратегія спеціалізації	Стратегія ексклюзивного розподілу, налагодження зв'язку з клієнтом	Висока якість, краща точність діагностики, малий час на реагування, нижча ціна	Стратегія диференціації

Отже, базовою є стратегія диференціації, тобто зорієнтованості на користувача та задоволенні його потреб шляхом покращення характеристик товару в порівнянні з конкурентами, альтернативою є стратегія спеціалізації, тобто у разі провалу стратегії диференціації за основу буде прийнятий один цільовий сегмент та його потреби.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16) [40].

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ п/п</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
1	Проект не є «першопрохідцем»	Компанія буде забирати існуючих у конкурентів	Деякі характеристики будуть скопійовані, але не найважливіші	Стратегія заняття конкурентної ніші

Отже, була вибрана стратегія заняття конкурентної ніші, так як орієнтація буде на декілька сегментів. Ніша буде задовольняти головним потребам, таким як: бути прибутковою, залишатися стабільною упродовж довгого часу, бути непривабливою для конкурентів, відповідати цілям і

ресурсам компанії. Головним буде підтримка і розвиток основного продукту та орієнтація на вимоги споживача.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляється стратегія позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект (табл. 5.17) [40].

Таблиця 5.16. Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні і позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Висока якість, точність, низька ціна, швидке реагування на зношення	Стратегія диференціа ції	Краща точність, швидке реагування на зношення, нижча ціна	Швидке реагування Точність Менша ціна в порівнянні з конкурентами

Отже, за базову стратегію розвитку була обрана стратегія диференціації, за альтернативну – спеціалізації. За стратегію конкурентної поведінки була обрана стратегія заняття конкурентної ніші. Основними сегментами були обрані державні та приватні підприємства, не дивлячись на велику конкуренцію і складність входу до цих сегментів. Це є можливим через наявність характеристик, тих які необхідні споживачу, на тому ж рівні або кращих, ніж у конкурентів. Передбачається тісна співпраця і комунікація з клієнтами для виявлення нагальних потреб і вдосконалення продукту.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 5.18 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару [40].

Таблиця 5.17. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами</i>
----------	----------------	--------------------	--

<i>n/n</i>		<i>пропонує товар</i>	<i>(існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Висока якість	Висока якість	Якість діагностики знаходиться на високому рівні
2	Висока точність	Краща точність	Точність більша, ніж у конкурентів за рахунок контролю по двом параметрам
3	Реагування на зношення	Оперативне реагування	Миттєве реагування на вихід зношення за межі допуску і корекція режимів
4	Невисока ціна	Невисока ціна	Найнижча ціна за рахунок дешевих матеріалів

Отже, визначивши ключові переваги перед конкурентами формується маркетингова концепція товару, тобто визначення потреб клієнту, аналіз того, чи відповідає даний товар вимогам покупця та за рахунок чого у нашого продукту є можливість виграти конкуренцію у товарів-аналогів. Було визначено, що товар відповідає вимогам та має переваги над конкурентами.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 5.19) [40].

Таблиця 5.18. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Підвищена точність діагностики процесу різання, підвищена швидкість реакції на зношення інструменту, невисока ціна порівняно з конкурентами		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Якість	Нм	Тл
	2. Точність	Нм	Тл
	3. Швидкість реакції	Нм	Тх
	4. Встановлення на верстат	М	Тх
		Нм	Е
	5. Ціна	М	Тх
	6. Транспортабельність		
	Якість: Відповідає нормам ДСТУ 2807-94 «Устаткування метало- та деревообробне. Загальні методи безпеки»		
Пакування: Звичайна картонна коробка із фотографією системи діагностики, торгівельною маркою, назвою продукту і технічними характеристиками			
Марка: назва організації-розробника + «Система діагностики процесу різання»			
III. Товар із підкріпленням	Розповсюдження реклами		
	Акція, при закупці продукції оптом		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Захист інтелектуальної власності, патент на винахід.			

В таблиці 5.19 ми створюємо трирівневу модель нашого товару, що включає задум товару та його вигоди, основі характеристики готового товару, спосіб його пакування та захисту від копіювання та плагіату.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 5.20) [40].

Таблиця 5.19. Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	-	20000	Високий	16000 - 18000 грн

Отже, оскільки товарів-замінників на ринку немає, то проаналізувавши рівень цін на товари-аналоги та вартість закупівлі матеріалів, створення програмного забезпечення, та компонування всього цього в єдину систему було визначено, що продукт буде дешевшим, ніж у конкурентів, а межі встановлення ціни на товар будуть 16000-18000 гривень.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.21) [40]:

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 5.20. Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Звична купівля з деяким змінами, або модифікована закупівля. Вона передбачає придбання дещо змінених товарів (послуг), або зміну ціни на товар (послугу), або зміну	Постачальник виконує такі основні функції: розробка продукту, доробка, зберігання, посередник виконує функції: продаж, безпосередній контакт з покупцем, просування до	Канал першого рівня	Система збуту через посередника. Виробник проектує товар, розробляє його і доробляє по необхідності, а посередник продає товар клієнту і використовує три способи прямого

	кількості постачання.	оптових і роздрібних торгових ланкам.		продажу : - Торгівля через магазини - Посилкова торгівля - Торгівля в роздріб
--	-----------------------	---------------------------------------	--	--

Для збуту була вибрана система через посередника через те, що даний товар є громіздким, збільшується його затребуваність і необхідно реалізовувати його і в Україні і за границею, тому всі маркетингові послуги, тобто продаж, доставку і консультації з приводу товару буде робити посередник, це у свою чергу дозволяє постачальнику сконцентруватися на виготовленні товару та його моментальній доробці при необхідності.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.22) [40].

Таблиця 5.21. Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Перегляд інформаційних ресурсів із потрібним якісним товаром за доступною ціною, за доступною ціною і гарною якістю	Інтернет ресурси, каталоги інструментів, виставки, рекламні статті, презентації виробників	Послідовність у реалізації обраної позиції. Доступність та об'єктивність інформації про фірму та товар. Планомірність і послідовність при прийнятті рішень.	Інформаційне завдання про новий товар, та формування знань про марку та виробника	Найвища точність та своєчасно зміна режимів різання при зношенні інструменту

Отже, в даному розділі було визначено ключові переваги товару перед конкурентами за рахунок яких можна входити до ринку, також були описані три рівні моделі товару, де були написані всі нюанси виготовлення, транспортування, торгової марки та захисту виробу. На основі цін

встановлених конкурентами на товари-аналоги та підрахунку собівартості виробництва системи діагностики з експертами було зроблено висновок, що продукт буде дешевшим, ніж у конкурентів, а розпад цін буде від 16000 до 18000 гривень, при цьому прибуток буде поступати з переманюваних клієнтів від конкурентів та масовості закупівель. Система збуту буде мати глибину першого рівня, тобто з наявністю одного посередника, який буде займатися продажом, доставкою та консультацією по товару. За концепцією маркетингових комунікацій було визначено джерела інформації, з яких черпають знання про продукцію покупці, та прийнято рішення рекламувати товар через інтернет, каталоги, виставки та презентації, прийнята концепція рекламного звернення.

Висновки до розділу

1. Запропонований продукт, а саме “Система діагностики зношення різального інструменту при виготовленні деталей приладів на верстатах з ЧПК з використанням адаптивного управління” є актуальним, тому що в інформаційному періоді спостерігається тенденція до повної автоматизації виробництва, тобто організація “безлюдної технології” для створення продукції. Для входження стартап-проекту до ринку було визначено, що є багато напрямків застосування даного проекту та він має численні вигоди для користувача, такі як: точне і своєчасне виявлення зношення різального інструменту; порівняно недорога вартість обладнання; підвищення працездатності різального інструменту за рахунок коректування режимів різання; не має необхідності перелаштовувати верстат під систему діагностики; якісне і безперебійне проведення діагностики. Також було проведено порівняння з прямими конкурентами і визначено сильні, слабкі та нейтральні сторони проекту. Сильних сторін виявилось значно більше, ніж інших, тож ідею можна назвати актуальною та конкурентоспроможною.

2. Було визначено, що для здійснення проекту наявні всі технології, та всі їх можна здійснити, отже не буде залежності від інвесторів. Також було

проаналізовано ринок та його потреби і визначено напрямок, в якому буде проводити реалізацію продукції наша компанія. Ними виявилися приладо-, машино-, авіа-, та ракетобудівні підприємства та заводи. За рахунок якостей продукту, таких як висока точність, невисока ціна, простота встановлення та функціонування без людського втручання будуть задоволені потреби споживачів, а отже є можливість успішного входження у ринок. Проаналізувавши фактори загроз та можливостей було встановлено, що наявність таких бар'єрів входження до ринка як висока конкуренція, малий попит на продукцію, інфляція, старіння продукції та відсутність кадрів з обслуговування системи діагностики компенсується можливостями такими, як попит на високоякісний продукт економічними та науково-технічними чинниками, створенням роздрібної мережі та можливість забрати весь ринок під свій контроль. Були визначені фактори конкурентоспроможності, які виявилися або такими ж або кращими, ніж у конкурентів. Орієнтація на споживача дозволить якісно відстежувати тренди розвитку промисловості та дороблювати продукцію згідно вимогам ринку. Альтернативою ринкової поведінки було обрано модернізацію вже існуючої системи.

3. При аналізі потенційних груп споживачів було вибрано орієнтацію на приватні підприємства та обрано стратегію диференційованого маркетингу, тому що працюємо із конкретним сегментом, розробляючи для нього програму ринкового впливу. За базову стратегію було обрано стратегію диференціації, за альтернативну – спеціалізації. За базову стратегію конкурентної поведінки було обрано стратегію зайняття конкурентної ніші

4. В кінці проекту було обрано ключові переваги над конкурентами, встановлено межі цін, за якими буде реалізовуватися продукція. Також було обрано стратегію збуту товару через посередника та проаналізовано концепцію маркетингових комунікацій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Було розроблено та вдосконалено двопараметричну адаптивну систему керування процесу обробки деталей на станках з ЧПК в умовах «безлюдного виробництва», що дозволить підвищити точність та надійність процесу обробки та якість поверхні деталей приладів. Для цього було:

1. Проведено критичний аналіз існуючих систем та методів адаптивного керування;
2. Встановлено взаємозв'язок крутного моменту та віброакустичної емісії зі зношуванням інструменту на основі досліджень процесу різання;
3. Розроблено математичну модель, за якою буде функціонувати система адаптивного керування;
4. Проведено математичне моделювання та розроблено програмне забезпечення системи;
5. Створено структурну схему та алгоритм функціонування адаптивної системи керування;
6. Проведено експериментальні дослідження залежності крутного моменту та віброакустичної емісії від зношення інструменту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Приборостроение [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://studfiles.net/preview/2827691/page:10/>.
2. Румбешта В.О. Курс лекцій по курсу: «Системи керування якістю виготовлення виробів» / В.О. Румбешта – НТУУ «КПІ», 2000. – 85с.
3. Адаптивная система управления / В.А. Остафьев, Г.С. Тымчик, В.В. Шевченко // Механизация и автоматизация управления. – 1983. – № 1. – С. 18-20.
4. Ларшин В.П. Интегрированные технологические системы в машиностроении / В.П. Ларшин // Тр. Одес. политехн. ун-та. - 1999. - Вып.3(9). - С.55-58.
5. Рыбалко А. П. Системы технологической диагностики и адаптивного управления для станков с ЧПУ / А. П. Рыбалко, Н. В. Лищенко, В. П. Ларшин. // Високі технології в машинобудуванні. – 2015. – №1. – С. 150–161.
6. Системы адаптивного управления (САУ) станками. Сущность систем адаптивного управления, применяемых на станках [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://delta-grup.ru/bibliot/7k/47.htm>.
7. Системы адаптивного управления [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://studfiles.net/preview/2663775/page:34/>.
8. Адаптивные системы автоматического управления [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://poznayka.org/s75157t1.html>.
9. Влацкая И. В. Адаптивная система управления технологическим процессом обработки деталей на оборудовании с ЧПУ / И. В. Влацкая, С. И. Сормов. // Вестник ОГУ. – 2005. – №12. – С. 237–242.
10. Балакшин Б.С. Необходимость оборудования программных станков системами адаптивного управления / Б.С. Балакшин // Станки и инструмент. - 1973. - №3.- С. 4-6.

11. Тимофеев А. В. Адаптивные робототехнические комплексы / А. В. Тимофеев. – Л.: Машиностроение, 1988. – 332 с.
12. Физические основы процесса резания металлов. Коллектив авторов. Под редакцией проф. В.А. Остафьева. Издательское объединение «Вища школа», 1976, 136 с.
13. Козочкин М.П. Динамика процесса резания. Теория, эксперименты, анализ / М. П. Козочкин. - LAP, 2013. – 296 с.
14. Ящерицын П.И. Основы резания материалов и режущий инструмент: [Учебник для машиностроит. спец. вузов] / П.И.Ящерицын, М.Л. Еременко, Н.И. Жигалко. – 2-е изд., доп. и перераб. – Мн.: Выш. Школа, 1981.- С. 7-10.
15. Панов А.А. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин и др. М.: Машиностроение, 2004. – 416 с.
16. Грицай І.Є. Різання металів. Теорія різання / І.Є. Грицай, М.Л. Кукляк. – Львів: Видавництво львівської політехніки, 2005. – 132 с.
17. Лоладзе Т. Н. Міцність і зносостійкість ріжучого інструменту / Т. Н. Лоладзе. - М.: Машинобудування, 1982. – 320 с.
18. Лурье Г.Б. Износ режущего инструмента / Г.Б. Лурье. - М.: Высшая школа, 1991. – 354 с.
19. Коробов Ю. М. Електромеханічний знос при терті і різанні металів / Ю. М. Коробов, Г. А. Прейс. - Київ: Техніка, 1976. – 200 с.
20. Куксенова Л.И. Методы испытания на трения и износ / Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков. - М.: Интермет Инжениринг, 2001. – 152 с.
21. Сероухов П.Ю., Пушкин Р.Л. Контроль и прогнозирование износа режущего инструмента при помощи подсистемы диагностики. Статья. – Московский государственный технологический университет. – 2009.
22. Каніси Р. Спосіб визначення зносу ріжучого інструмента [Патент Японія № 1209545, МПК В23 Q 17/00]. Каніси Ретсу, Фуззіцу К. К. Заяв., 1980.

23. Козочкин М. П. Способ определения износа режущего инструмента (RU 2478929) / Козочкин М. П., Григорьев С. Н., Порватов А. Н. - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский Государственный Технологический Университет "СТАНКИН".

24. Плотников А. Л., Крылов Е. Г. Способ контроля состояния режущих кромок сборных многолезвийных инструментов. [Патент RU 2440031]. - Волгоградский государственный технический университет. – 2006.

25. Сариллов М.Ю., Максимов А.Ю. Контрольно-измерительный комплекс для контроля износа режущего инструмента. [Патент RU 2246072]. - Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. – 2001.

26. Мартинов Г. Н., Синопальников В. А., Григорьев А. С. Устройство контроля износа и прогнозирования остаточной стойкости режущего инструмента для системы ЧПУ станка. [Патент RU 220574].. - Московский Государственный Технологический Университет. – 2009.

27. Зайцев С.А. Контрольно-измерительные приборы и инструменты: Учебник / С.А. Зайцев, Д. Д. Грибанов, А. Н. Толстой, Р. В. Меркулов. – М.: Издательский центр “Академия”, 2003. – 464 с.

28. Силін С. С. Встановлення критерійних залежностей при різанні металів на основі вивчення теплових явищ / С. С. Силін, М.:Машинобудування, 1966, с.102-137. – [В кн.: Теплові явища і обробка різанням авіаційних матеріалів. Під ред. П. И. Бобрина. Праці МАТІ, Вип.64].

29. Егоров А.В. Способ измерения мощности резания материала [Патент РФ №2460051]. – 2011.

30. Барзов А.А. Пути повышения эффективности эксплуатации режущего инструмента с многогранными пластинами / А.А. Барзов, И.А. Тутнов, А.Ю. Кулагин и др. – М.: НИИмаш, 1980 – 52 с.

31. Румбешта В.А. Симута Н.А. Способ измерения сил резания при токарной обработке. – Вісник КНУТД №1 – 2012, С. 48-52.

32. Грешников В.А. Акустическая эмиссия / В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот. - М.: Изд-во стандартов, 1976 – 272 с.
33. Оглезнева Л.А. Акустические методы контроля и диагностики / Л.А. Оглезнева, А.Н. Калиниченк. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 292 с.
34. Добрышин С.А. Методы автоматизированного исследования вибраций машин. Справочник / С.А. Добрышин, М.С. Фельдман. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
35. Генкин М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Х. Соколова. – М.: Машиностроение, 1997. – 288 с.
36. Остафьев В. О. Система контролю зносу інструменту на основі віброакустичного сигналу / В. О. Остафьев, В. В. Кокаровцев. [Зб. Підвищення ефективності виробництва в машинобудуванні на основі застосування технологічного устаткування з ЧПК] – К.: 1980. - 18 с.
37. Добровинский И. Р. Виброакустический метод контроля износа режущего инструмента. Проблемы управления точностью автоматизированных производственных систем / Добровинский И. Р., Ломтев Е. А., Чувькин Б. В. Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. - Пенза, 1996. –96 с.
38. Надежность и диагностика технологических систем: Учебное пособие [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://vunivere.ru/work10204/page15>.
39. Подураев В.Н. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии / В.Н. Подураев, А.А. Барзов, В.А. Горелов. – М.: Машиностроение, 1998. – 56 с.
40. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

ДОДАТОК

Код програмного забезпечення для адаптивного керування обробкою деталей приладів на верстатах з ЧПК, розробленого на мові програмування C# в інтегрованому середовищі розробки Microsoft Visual Studio C# 2010 Express.

```
#pragma once
#include "math.h"

namespace Project1 {

    using namespace System;
    using namespace System::ComponentModel;
    using namespace System::Collections;
    using namespace System::Windows::Forms;
    using namespace System::Data;
    using namespace System::Drawing;

    /// <summary>
    /// Сводка для MyForm3
    /// </summary>
    public ref class MyForm3 : public System::Windows::Forms::Form
    {
    public:
        MyForm3(void)
        {
            InitializeComponent();
            //
            //TODO: добавьте код конструктора
            //
        }

    protected:
        /// <summary>
        /// Освободить все используемые ресурсы.
        /// </summary>
        ~MyForm3()
        {
            if (components)
            {
                delete components;
            }
        }

    private: System::Windows::Forms::Label^ label1;
    protected:
    private: System::Windows::Forms::TextBox^ textBox_tt;
    private: System::Windows::Forms::TextBox^ textBox_vv;
    private: System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart^ chart2;
    private: System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart^ chart3;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label11;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label2;
    private: System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart^ chart1;
    private: System::Windows::Forms::Label^ label3;
```

```

private: System::Windows::Forms::Button^ button6;
private: System::Windows::Forms::Label^ label6;
private: System::Windows::Forms::Label^ label7;
private: System::Windows::Forms::Label^ label4;
private: System::Windows::Forms::Label^ label5;
private: System::Windows::Forms::Label^ label8;
private: System::Windows::Forms::Label^ label9;
private: System::Windows::Forms::MenuStrip^ menuStrip1;
private: System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem^ файлToolStripMenuItem;
private: System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem^ змінитиToolStripMenuItem;
private: System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem^ сервісToolStripMenuItem;
private: System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem^ проАвтораToolStripMenuItem;
private: System::Windows::Forms::TextBox^ textBox1;
private: System::Windows::Forms::TextBox^ textBox2;
private: System::Windows::Forms::ComboBox^ comboBox1;
private: System::Windows::Forms::ComboBox^ comboBox2;
private: System::Windows::Forms::Button^ button1;
private: System::Windows::Forms::Button^ button4;
private: System::Windows::Forms::Button^ button2;
private: System::Windows::Forms::Button^ button3;
private:
    /// <summary>
    /// Обязательная переменная конструктора.
    /// </summary>
    System::ComponentModel::Container ^components;

#pragma region Windows Form Designer generated code
    /// <summary>
    /// Требуемый метод для поддержки конструктора — не изменяйте
    /// содержимое этого метода с помощью редактора кода.
    /// </summary>
    void InitializeComponent(void)
    {
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea^ chartArea4 =
        (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend^ legend4 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series^ series4 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea^ chartArea5 =
        (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend^ legend5 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series^ series5 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea^ chartArea6 =
        (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::ChartArea());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend^ legend6 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Legend());
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series^ series6 = (gcnew
        System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Series());
        this->label1 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->textBox_tt = (gcnew System::Windows::Forms::TextBox());
        this->textBox_vv = (gcnew System::Windows::Forms::TextBox());
        this->chart2 = (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart());
        this->chart3 = (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart());
        this->label11 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label2 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->chart1 = (gcnew System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::Chart());
    }

```



```

        this->label3 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->button6 = (gcnew System::Windows::Forms::Button());
        this->label6 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label7 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label4 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label5 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label8 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->label9 = (gcnew System::Windows::Forms::Label());
        this->menuStrip1 = (gcnew System::Windows::Forms::MenuStrip());
        this->файлToolStripMenuItem = (gcnew
System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem());
        this->змінитиToolStripMenuItem = (gcnew
System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem());
        this->сервісToolStripMenuItem = (gcnew
System::Windows::Forms::ToolStripMenuItem());
        this->textBox1 = (gcnew System::Windows::Forms::TextBox());
        this->textBox2 = (gcnew System::Windows::Forms::TextBox());
        this->comboBox1 = (gcnew System::Windows::Forms::ComboBox());
        this->comboBox2 = (gcnew System::Windows::Forms::ComboBox());
        this->button1 = (gcnew System::Windows::Forms::Button());
        this->button4 = (gcnew System::Windows::Forms::Button());
        this->button2 = (gcnew System::Windows::Forms::Button());
        this->button3 = (gcnew System::Windows::Forms::Button());
        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart2))-
>BeginInit();
        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart3))-
>BeginInit();
        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart1))-
>BeginInit();

        this->menuStrip1->SuspendLayout();
        this->SuspendLayout();
        //
        // label1
        //
        this->label1->AutoSize = true;
        this->label1->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 14,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label1->Location = System::Drawing::Point(12, 22);
        this->label1->Name = L"label1";
        this->label1->Size = System::Drawing::Size(309, 22);
        this->label1->TabIndex = 0;
        this->label1->Text = L"Віброакустична емісія W";
        //
        // textBox_tt
        //
        this->textBox_tt->Location = System::Drawing::Point(646, 58);
        this->textBox_tt->Name = L"textBox_tt";
        this->textBox_tt->Size = System::Drawing::Size(121, 20);
        this->textBox_tt->TabIndex = 16;
        //
        // textBox_vv
        //
        this->textBox_vv->Location = System::Drawing::Point(646, 86);
        this->textBox_vv->Name = L"textBox_vv";
        this->textBox_vv->Size = System::Drawing::Size(121, 20);
        this->textBox_vv->TabIndex = 17;
        //
        // chart2
        //
        chartArea4->Name = L"ChartArea1";
        this->chart2->ChartAreas->Add(chartArea4);

```

```

        legend4->Name = L"Legend1";
        this->chart2->Legends->Add(legend4);
        this->chart2->Location = System::Drawing::Point(16, 43);
        this->chart2->Name = L"chart2";
        series4->ChartArea = L"ChartArea1";
        series4->ChartType
System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::SeriesChartType::Line;
        series4->Legend = L"Legend1";
        series4->Name = L"Series1";
        this->chart2->Series->Add(series4);
        this->chart2->Size = System::Drawing::Size(389, 198);
        this->chart2->TabIndex = 20;
        this->chart2->Text = L"chart2";
        //
        // chart3
        //
        chartArea5->Name = L"ChartArea1";
        this->chart3->ChartAreas->Add(chartArea5);
        legend5->Name = L"Legend1";
        this->chart3->Legends->Add(legend5);
        this->chart3->Location = System::Drawing::Point(16, 279);
        this->chart3->Name = L"chart3";
        series5->ChartArea = L"ChartArea1";
        series5->ChartType
System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::SeriesChartType::Line;
        series5->Legend = L"Legend1";
        series5->Name = L"Series1";
        this->chart3->Series->Add(series5);
        this->chart3->Size = System::Drawing::Size(389, 198);
        this->chart3->TabIndex = 22;
        this->chart3->Text = L"chart3";
        //
        // label11
        //
        this->label11->AutoSize = true;
        this->label11->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 14,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label11->Location = System::Drawing::Point(12, 258);
        this->label11->Name = L"label11";
        this->label11->Size = System::Drawing::Size(218, 22);
        this->label11->TabIndex = 21;
        this->label11->Text = L"Крутний момент різання  $M_{кр}$ ";
        //
        // label2
        //
        this->label2->AutoSize = true;
        this->label2->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 14,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label2->Location = System::Drawing::Point(468, 22);
        this->label2->Name = L"label2";
        this->label2->Size = System::Drawing::Size(275, 22);
        this->label2->TabIndex = 25;
        this->label2->Text = L"Початкові параметри обробки";
        //
        // chart1
        //
        chartArea6->Name = L"ChartArea1";
        this->chart1->ChartAreas->Add(chartArea6);
        legend6->Name = L"Legend1";
        this->chart1->Legends->Add(legend6);

```

```

        this->chart1->Location = System::Drawing::Point(472, 279);
        this->chart1->Name = L"chart1";
        series6->ChartArea = L"ChartArea1";
        series6->ChartType
System::Windows::Forms::DataVisualization::Charting::SeriesChartType::Spline;
        series6->Legend = L"Legend1";
        series6->Name = L"Series1";
        this->chart1->Series->Add(series6);
        this->chart1->Size = System::Drawing::Size(389, 198);
        this->chart1->TabIndex = 27;
        this->chart1->Text = L"chart1";
        //
        // label3
        //
        this->label3->AutoSize = true;
        this->label3->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 14,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label3->Location = System::Drawing::Point(468, 258);
        this->label3->Name = L"label3";
        this->label3->Size = System::Drawing::Size(368, 22);
        this->label3->TabIndex = 26;
        this->label3->Text = L"Графік зношення різального інструменту";
        //
        // button6
        //
        this->button6->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 13,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->button6->Location = System::Drawing::Point(720, 509);
        this->button6->Name = L"button6";
        this->button6->Size = System::Drawing::Size(141, 39);
        this->button6->TabIndex = 31;
        this->button6->Text = L"Роздрукувати";
        this->button6->UseVisualStyleBackColor = true;
        //
        // label6
        //
        this->label6->AutoSize = true;
        this->label6->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label6->Location = System::Drawing::Point(468, 114);
        this->label6->Name = L"label6";
        this->label6->Size = System::Drawing::Size(104, 19);
        this->label6->TabIndex = 35;
        this->label6->Text = L"Коефіцієнт kw";
        //
        // label7
        //
        this->label7->AutoSize = true;
        this->label7->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label7->Location = System::Drawing::Point(468, 142);
        this->label7->Name = L"label7";
        this->label7->Size = System::Drawing::Size(155, 19);
        this->label7->TabIndex = 36;
        this->label7->Text = L"Матеріал інструменту";
        //
        // label4
        //

```

```

        this->label4->AutoSize = true;
        this->label4->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label4->Location = System::Drawing::Point(468, 85);
        this->label4->Name = L"label4";
        this->label4->Size = System::Drawing::Size(105, 19);
        this->label4->TabIndex = 38;
        this->label4->Text = L"Подача, мм/об";
        //
        // label5
        //
        this->label5->AutoSize = true;
        this->label5->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label5->Location = System::Drawing::Point(468, 57);
        this->label5->Name = L"label5";
        this->label5->Size = System::Drawing::Size(148, 19);
        this->label5->TabIndex = 37;
        this->label5->Text = L"Глибина різання, мм";
        //
        // label8
        //
        this->label8->AutoSize = true;
        this->label8->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label8->Location = System::Drawing::Point(468, 200);
        this->label8->Name = L"label8";
        this->label8->Size = System::Drawing::Size(111, 19);
        this->label8->TabIndex = 42;
        this->label8->Text = L"Оброб. діаметр";
        //
        // label9
        //
        this->label9->AutoSize = true;
        this->label9->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 12,
System::Drawing::FontStyle::Regular, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
        static_cast<System::Byte>(204)));
        this->label9->Location = System::Drawing::Point(468, 172);
        this->label9->Name = L"label9";
        this->label9->Size = System::Drawing::Size(118, 19);
        this->label9->TabIndex = 41;
        this->label9->Text = L"Оброб. матеріал";
        //
        // menuStrip1
        //
        this->menuStrip1->Items->AddRange(gcnew cli::array<
System::Windows::Forms::ToolStripItem^ >(4) {
        this->menuStrip1->Location = System::Drawing::Point(0, 0);
        this->menuStrip1->Name = L"menuStrip1";
        this->menuStrip1->Size = System::Drawing::Size(888, 24);
        this->menuStrip1->TabIndex = 43;
        this->menuStrip1->Text = L"menuStrip1";
        //
        // файлToolStripMenuItem
        //
        this->файлToolStripMenuItem->Name = L"файлToolStripMenuItem";
        this->файлToolStripMenuItem->Size = System::Drawing::Size(48, 20);
        this->файлToolStripMenuItem->Text = L"Файл";
        //

```

```

// змінитиToolStripMenuItem
//
this->змінитиToolStripMenuItem->Name = L"змінитиToolStripMenuItem";
this->змінитиToolStripMenuItem->Size = System::Drawing::Size(64, 20);
this->змінитиToolStripMenuItem->Text = L"Змінити";
//
// сервісToolStripMenuItem
//
this->сервісToolStripMenuItem->Name = L"сервісToolStripMenuItem";
this->сервісToolStripMenuItem->Size = System::Drawing::Size(55, 20);
this->сервісToolStripMenuItem->Text = L"Сервіс";
//
// textBox1
//
this->textBox1->Location = System::Drawing::Point(646, 115);
this->textBox1->Name = L"textBox1";
this->textBox1->Size = System::Drawing::Size(121, 20);
this->textBox1->TabIndex = 44;
//
// textBox2
//
this->textBox2->Location = System::Drawing::Point(646, 201);
this->textBox2->Name = L"textBox2";
this->textBox2->Size = System::Drawing::Size(121, 20);
this->textBox2->TabIndex = 45;
//
// comboBox1
//
this->comboBox1->FormattingEnabled = true;
this->comboBox1->Location = System::Drawing::Point(646, 143);
this->comboBox1->Name = L"comboBox1";
this->comboBox1->Size = System::Drawing::Size(121, 21);
this->comboBox1->TabIndex = 46;
//
// comboBox2
//
this->comboBox2->FormattingEnabled = true;
this->comboBox2->Location = System::Drawing::Point(646, 173);
this->comboBox2->Name = L"comboBox2";
this->comboBox2->Size = System::Drawing::Size(121, 21);
this->comboBox2->TabIndex = 47;
//
// button1
//
this->button1->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 13,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->button1->Location = System::Drawing::Point(578, 509);
this->button1->Name = L"button1";
this->button1->Size = System::Drawing::Size(141, 39);
this->button1->TabIndex = 48;
this->button1->Text = L"Зберегти";
this->button1->UseVisualStyleBackColor = true;
//
// button4
//
this->button4->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 13,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->button4->Location = System::Drawing::Point(436, 509);
this->button4->Name = L"button4";
this->button4->Size = System::Drawing::Size(141, 39);

```

```

this->button4->TabIndex = 49;
this->button4->Text = L"Побудувати";
this->button4->UseVisualStyleBackColor = true;
//
// button2
//
this->button2->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 13,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->button2->Location = System::Drawing::Point(114, 509);
this->button2->Name = L"button2";
this->button2->Size = System::Drawing::Size(141, 39);
this->button2->TabIndex = 51;
this->button2->Text = L"Побудувати";
this->button2->UseVisualStyleBackColor = true;
//
// button3
//
this->button3->Font = (gcnew System::Drawing::Font(L"Times New Roman", 13,
System::Drawing::FontStyle::Bold, System::Drawing::GraphicsUnit::Point,
static_cast<System::Byte>(204)));
this->button3->Location = System::Drawing::Point(261, 509);
this->button3->Name = L"button3";
this->button3->Size = System::Drawing::Size(141, 39);
this->button3->TabIndex = 50;
this->button3->Text = L"Роздрукувати";
this->button3->UseVisualStyleBackColor = true;
//
// MyForm3
//
this->AutoScaleDimensions = System::Drawing::SizeF(6, 13);
this->AutoScaleMode = System::Windows::Forms::AutoScaleMode::Font;
this->ClientSize = System::Drawing::Size(888, 565);
this->Controls->Add(this->button2);
this->Controls->Add(this->button3);
this->Controls->Add(this->button4);
this->Controls->Add(this->button1);
this->Controls->Add(this->comboBox2);
this->Controls->Add(this->comboBox1);
this->Controls->Add(this->textBox2);
this->Controls->Add(this->textBox1);
this->Controls->Add(this->label8);
this->Controls->Add(this->label9);
this->Controls->Add(this->label4);
this->Controls->Add(this->label5);
this->Controls->Add(this->label7);
this->Controls->Add(this->label6);
this->Controls->Add(this->button6);
this->Controls->Add(this->chart1);
this->Controls->Add(this->label3);
this->Controls->Add(this->label2);
this->Controls->Add(this->chart3);
this->Controls->Add(this->label11);
this->Controls->Add(this->chart2);
this->Controls->Add(this->textBox_vv);
this->Controls->Add(this->textBox_tt);
this->Controls->Add(this->label1);
this->Controls->Add(this->menuStrip1);
this->MainMenuStrip = this->menuStrip1;
this->Name = L"MyForm3";
this->Text = L"Graphically wear v1.0";

```

```

        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart2))-
>EndInit();
        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart3))-
>EndInit();
        (cli::safe_cast<System::ComponentModel::ISupportInitialize^>(this->chart1))-
>EndInit();

        this->menuStrip1->ResumeLayout(false);
        this->menuStrip1->PerformLayout();
        this->ResumeLayout(false);
        this->PerformLayout();

    }
#pragma endregion

double h(double dh, double k_w, double j, double u, double s,
double v, double k_4, double k_rf, double k_kf,
double p_c, double d, double nu, double t_0) {
    return dh * k_w * j * u * s * v * k_4 * k_rf * k_kf * exp(-d / nu / t_0) / p_c / 60000;
}

array<array<double>^>^ rng(double x0, double x1, double step, array<double>^ y0,
array<double>^ kk) {
    int n = (int)((x1 - x0) / step);
    if (n < 1)
        n = 1;
    double h = (x1 - x0) / n;
    array<array<double>^>^ ans = gcnew array<array<double>^>(n + 1);
    ans[0] = gcnew array<double>(4);
    ans[0][0] = x0;
    array<double>^ yk = gcnew array<double>(3);
    for (int i = 1; i < 4; i++) {
        ans[0][i] = y0[i - 1];
        yk[i - 1] = y0[i - 1];
    }
    array<double>^ k1 = gcnew array<double>(3);
    array<double>^ k2 = gcnew array<double>(3);
    array<double>^ k3 = gcnew array<double>(3);
    array<double>^ k4 = gcnew array<double>(3);
    for (int i = 1; i < n + 1; i++)
    {
        ans[i] = gcnew array<double>(4);
        ans[i][0] = x0 + i * h; //Current x
        k1 = df_RIC(ans[i][0], yk, h, kk, y0);
        for (int j = 0; j < 3; j++)
            yk[j] = yk[j] + k1[j] / 2;
        k2 = df_RIC(ans[i][0] + h / 2, yk, h, kk, y0);
        for (int j = 0; j < 3; j++)
            yk[j] = yk[j] + k2[j] / 2;
        k3 = df_RIC(ans[i][0] + h / 2, yk, h, kk, y0);
        for (int j = 0; j < 3; j++)
            yk[j] = yk[j] + k3[j];
        k4 = df_RIC(ans[i][0] + h, yk, h, kk, y0);
        for (int j = 0; j < 3; j++)
            yk[j] = yk[j] + (k1[j] + 2 * k2[j] + 2 * k3[j] + k4[j]) / 6;

        for (int j = 1; j < 4; j++)
            ans[i][j] = yk[j - 1];
    }
    return ans;
}

array<double>^ df_RIC(double x, array<double>^ y, double h, array<double>^ k,
array<double>^ ci) {

```

```

        array<double>^ ans = gcnew array<double>(3);
        double t = 4;
        ans[0] = h * (1 / t * (ci[0] - y[0]) - k[0] * y[0] + k[3] * y[1]);
        ans[1] = h * (1 / t * (ci[1] - y[1]) + k[0] * y[0] - k[1] * y[1] + k[2] * y[2] - k[3] *
y[1]);

        ans[2] = h * (1 / t * (ci[2] - y[2]) + k[1] * y[1] - k[2] * y[2]);
        return ans;
    }

private: System::Void button2_Click(System::Object^ sender, System::EventArgs^ e) {
}
};
}

```